

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Martin Ott

**HOONETE ENERGIATARBIMINE SÕLTUVALT
PIIRDETARINDITE SOOJUSISOLATSIOONIMUUTUSTEST**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja: PhD Alar Noorvee

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2018

Hoonete energiatarbimine sõltuvalt piirdetarindite soojusisolatsiooni muutustest

Lühikokkuvõte: Energiatõhusate hoonete ehitamisega on kasvanud materjaliressursside kasutus ning hoone elutsükli jooksul on suurenenud sisendenergia tarbimine operatiivse (kasutusaegse) energia vähendamise arvelt. Hoonete energiatõhususnõuded käsitlevad eeskätt hoonete kasutusaegse energia kokkuhoidu, kuid ei arvesta piisavalt hoonete ehitamise käigus materjalide kasutamisega kaasnevat sisendenergiat. Uurimustöö eesmärgiks oli läbi viia hoonete energiatarbimise analüüs seoses piirdetarinditega, hõlmates erinevate soojustusmaterjalide kasutamisest ja nende paksuse muutmisest tuleneva sisend- ja operatiivse energiatarbimise hindamist ning selle muutust 50-aastase hoone ekspluatatsiooniperioodi jooksul. Materjalide sisendenergia hindamisel kasutati hällist-väravani meetodit. Uuringu läbiviimiseks projekteeris autor hoone mudeli Revit 2018.3 programmis. Seejärel kasutati BV² programmi, mis võimaldas analüüsida hoone energiatarvet. Analüüsi käigus selgus, et hoonete sisendenergia summaarne osakaal moodustas kuni 21,79% kogu hoone summaarsest energiatarbimisest (hoone 50-aastase kasutusperioodi jooksul). Soojustusmaterjali muutes ning materjalile paksust lisades suurenes materjali sisendenergia kuni 8,6 korda. Töö tulemusena selgus, et kuigi hoone operatiivse energiatõhususe osas on kõige paremaks soojustusmaterjaliks EPS, siis kõige optimaalsem on kasutada soojustusmaterjalina kivivilla, sest siis on kogu hoone 50-aastase olelusringi summaarne energiakulu kõige väiksem.

Märksõnad: energiatõhusus, hoonete energiatarve, sisendenergia, operatiivne energia
CERCS: T230 Hooneehitus

Energy consumption of buildings in respect of the changes in the thermal insulation of the buildings' exterior borders

Abstract: The construction of energy efficient buildings has increased the use of material resources and the consumption of embodied energy during the lifetime of the buildings have increased at the expense of operational energy reduction. The energy efficiency requirements of buildings primarily address the buildings' operational energy savings, but do not adequately take into account the embodied energy generated by the use of materials during the construction of the buildings. The purpose of the research was to conduct an analysis of the buildings' energy consumption in relation to the buildings' exterior borders, including the assessment of the embodied energy and operational energy consumption resulting from the use of different thermal insulation materials and their change in thickness, and its change during the buildings

50-year use period. The embodied energy of different materials was evaluated using a cradle-to-gate method. For the research, the author designed the building model using the Revit 2018.3 program. The BV² program was then used to analyze the energy consumption of the building. The analysis revealed that the total share of the buildings' embodied energy accounted up to 21,79% of buildings' total energy consumption during the buildings' 50-year period of use. Also, by changing the insulation material and adding material thickness, the material embodied energy of the studied buildings increased up to 8,6 times. As a result of the work, it turned out that although the best possible insulation material for operational energy efficiency is EPS, the most optimal solution is to use stone wool as an insulation material, because then the total energy consumption of the whole 50-year life cycle of building is the smallest.

Keywords: energy efficiency, energy consumption of buildings, embodied energy, operational energy

CERCS: T230 Building construction

Sisukord

Mõisted	6
Sissejuhatus	8
1. Valdkonna ülevaade	10
1.1. Energiakasutus ehitussektoris	10
1.2. Hoonete energiatõhususe regulatsioon	11
1.2.1. Euroopa tasand	11
1.2.2. Eesti tasand	12
1.3. Hoone piirdetarindi soojustamine	14
1.3.1. Hoone piirdetarind	14
1.3.2. Soojustusmaterjalid piirdetarindis.....	15
1.4. Hoonete ja materjali energiaanalüüs.....	16
1.4.1. Hoonete energiaanalüüs olelusingis	16
1.4.2. Materjalide energiaanalüüs olelusingis.....	17
1.5. Ülevaade kirjandusest	18
2. Materjal ja metoodika.....	20
2.1. Uuritav hoone	20
2.2. Kasutatavad tööriistad.....	21
2.2.1. Revit 2018	21
2.2.2. BV ²	21
2.3. Energiatarbimise määramine olelusingis.....	22
2.3.1. Uurimuse käsitusala	22
2.3.2. Operatiivne energia ja materjalide sisendenergia	23
2.3.3. Piirdetarindi soojusläbivuse (U-arv) arvutamine	24
2.3.4. Energiatõhususe arvutamine	24
3. Tulemused ja arutelu	27

3.1. Tüüphoonete energiatõhususarvud	27
3.2. Sein ja katuslaetarindi materjalide sisendenergia	28
3.3. Sisendenergia ja operatiivse energia tulemused erineva soojustusmaterjali korral	31
Kokkuvõte	38
Summary	40
Tänuavaldused	42
Kasutatud kirjandus	43
LISAD	48
Lisa 1. Tüüphoon 1 joonised ja asendiplaan.....	49
Lisa 2. Tüüphoon 1 andmed	51
Lisa 3. Piirdetarindite soojusläbivus (U-arv) tabelid.....	53
Lisa 4. Tüüphoonete energiatarbimine	60
Lisa 5. Materjali sisendenergiad hällist väravani meetodil	61
Lisa 6. Väikeelamu sein ja katuslae sisendenergiad	62
Lisa 7. Hoone summaarne sisendenergia ja summaarne operatiivne energia	68
Lisa 8. Kokkuhoitud operatiivne energia ja täiendavalt lisatud sisendenergia	69

Mõisted

Ehitise eluiga (*life cycle of building*) – ajavahemik ehitise ehitamisest ehitise lammutamiseni (EVS 932: 2017, 2017).

Energiakandjate kaalumistegurid – tegurid, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Energiatõhususarv [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] – arvutuslik summaarne tarnitud energiategurite kaalutud erikasutus hoone tüüpilisel kasutusel, millest arvatakse maha summaarne eksporditud energiategurite kaalutud erikasutus. Energiatõhususarv kajastab hoone kompleksset energiakasutust nii sisekliima tagamiseks, tarbevee soojendamiseks kui ka olme- ja muude elektriseadmete kasutamiseks ning see arvutatakse hoone köetava pinna ruutmeetri kohta hoone tüüpilisel kasutamisel (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Hoone energiatõhusus – käsitleb hoone energiatarbe optimeerimist ja energiatõhususarvu määramist (EVS 932: 2017, 2017).

Liginullenergiahoone – on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhususe- ja taastuvenergiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille energiatõhususarv on suurem kui $0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, kuid väikeelamul mitte suurem kui $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Madalenergiahoone – on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhususe- ja taastuvenergiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille puhul ei eeldata lokaalset elektri tootmist taastuvast energiaallikast. Energiatõhususarv ei tohi ületada $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ piirväärtust (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Operatiivne energia (*operational energy*) – Kasutusfaasis tarbitav energia, mida kasutatakse hoone kütmiseks, jahutamiseks, ventilatsiooniks, valgustustamiseks, tarbevee soojendamiseks ja erinevate majapidamisseadmete kasutamiseks (Chastas *et al.*, 2016).

Piirdetarindid (*building envelope*) – Ehitise põhiosa või piire, nagu sein, põrand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest (EVS 908-1:2016, 2016).

Primaarenergia – ühe kilovatt-tunni tarnitud energia tootmiseks vajalik esmane energiahulk taastuvatest ja mittetaastuvatest energiaallikatest, mis sisaldab kõiki energiaallika ammutamise, energia tootmise, ülekande ja jaotamise kadusid (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Sisendenergia (*embodied energy*) – Primaarenergia tarbimise hulk, mis on kulunud materjali kaevandamiseks, komponentide tootmiseks, toodete paigaldamiseks ja transportimiseks (Giordano *et al.*, 2017).

Soojuseriijuhtivus λ , W/ (m * K) (*thermal conductivity*) – materjali omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbi 1 meetri paksuse ja 1 m² pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindalade vahel on 1 K (EVS 908-1:2016, 2016).

Soojusläbivus U, W/ (m² * K) (*thermal transmittance*) – tarindi omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides läbi 1 m² pinnaga tarindi, kui temperatuuride vahe eri keskkondade vahel on 1 K (EVS 908-1:2016, 2016).

Soojustakistus R, m² * K/ W (*thermal resistance*) – kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojuse voogu (üldiselt soojusläbivuse teel) läbi toote või elemendi (pinnalt pinnale) statsionaarsetes tingimustes (EVS 908-1:2016, 2016).

Väikeelamu – Eramud ja/või suvemajad. Väikeelamute ehitamine on ajakulult kaks kuni kolm korda väiksem, sest hoone on lihtsa kuju ning konstruktsioonidega (Just & Just, 2016).

Sissejuhatus

Ehitussektor on üks peamisi materjali- ning energiatarbijaid maailmas (Santamouris, 2016). Suur osa primaarenergia kasutusest ning kasvuhoonegaaside heitest tuleneb ehitusmaterjalide tootmisest ning toimub hoone eksploatatsioonifaasis (Tettey *et al.*, 2014). Energiasääst on elamumajanduse jaoks järjest olulisem küsimus ning soojusisolatsioon on üks peamisi võimalusi, mis aitab energiatõhusust saavutada (Kaynakli, 2012).

Euroopa Liidus on võetud suund liginullenergiahoonete kontseptsioonile, kuid neile hoonetele kehtivad rangemad energiatõhususe nõuded (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). Vähese energiatarbega ehitisi iseloomustavad enamasti paksemad isolatsioonimaterjalid ning hoone komponentide väiksem soojusläbilaskvus (U), mis võib omakorda suurendada ehitusmaterjalide tootmist. Hoonete materjalide sisendenergia mõju on aga oluline mõista, et saaks optimeerida nende hoonete energiasäästu (Tettey *et al.*, 2014).

Hoone energiavajaduse kvantifitseerimiseks, kogu selle eluaja jooksul, kasutatakse ehitise olelusringi energiaanalüüsi. Sellise lähenemisviisi alla kuulub tavaliselt hoone ja tema materjalide tootmis-, ehitus-, kasutus- ja kasutusest kõrvaldamise etappidega seotud energianõudlus. See hõlmab esialgset sisendenergiat (materjali tootmiseks, tarnimiseks ja paigaldamiseks vajalikku energiat hoone esialgses konstruktsioonis) koos korduva sisendenergiaga, mis seisneb komponentide või materjalide hilisemas asendamises ja hooldamises hoone eluea jooksul (Rauf & Crawford, 2015). Võimalikult jätkusuutliku ehituskeskkonna loomiseks on vaja tegeleda nii energiatõhusa ehitusega kui ka materjalide tõhusa kasutamisega, et saaks vähendada keskkonnamõjusid ja vältida loodusvarade edasist ammendumist (Kovacic *et al.*, 2018).

Käesolevas uurimustöös, uuritakse hoone ja materjalide energiahulga muutumist, erinevate isolatsioonimaterjalide kasutamisel piirdetarindis. Uurimustöös muudetakse piirdetarindi konstruktsioonis isolatsiooni materjale nagu kivivill, klaasvill ning vahtpolüstüreen (EPS) ja nende mahte, samal ajal säilitades ülejäänud hoone konstruktsiooni parameetrid muutumatuna. Uuringus arvutatakse ja võrreldakse erinevate isolatsioonimaterjalide kasutamisel hoone sisendenergia hulka ning operatiivse energia hulka, hoone eeldatava 50-aastase eluea jooksul. Hoone projekteerimisel lähtuti Eesti Vabariigis kehtivast „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ määrusest, et saavutada vajalikud energiatõhususe nõuded (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015). Samuti lähtuti hoone kavandamisel ja materjalide

valikul avalikult kättesaadavate liginullenergia hoonete projektide (Timbeco Woodhouse OÜ, 2018; QP Arhitektid OÜ, 2018) ja juhendmaterjali näpunäidetest (TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017). Kuivõrd kehtiv „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ määrus käsitleb vaid hoone kasutusaegse energiatõhususe (operatiivse energia) küsimusi, siis on seni jäetud Eestis olulise tähelepanuta hoonete ehitusmaterjalidest tuleneva sisendenergia küsimused.

Uurimustöö eesmärgiks on läbi viia hoonete energiatarbimise analüüs, hõlmates erinevate soojustusmaterjalide kasutamisest tuleneva energiatarbe hindamist ning selle muutust 50-aastase hoone ekspluatatsiooniperioodi jooksul. Selle jaoks uuritakse hoone operatiivset energiat ning sisendenergiat. Magistritöö käigus:

- Selgub hoone ja materjalide sisendenergia hulk ja operatiivse energia hulk ning selle muutus 50-aastase hoone ekspluatatsiooni perioodi jooksul.
- Selgub, kuidas muutub hoone energiatarbimine soojustusmaterjali kihi paksenemisega piirdetarindis.
- Selgub, kuidas muutub hoone energiatarbimine erinevaid soojustusmaterjale kasutades ja milline on sobivaim soojustusmaterjal käsitletud materjalidest (kivivill, klaasvill ja vahtpolüstüreen) hoone kogu 50-aastast olelusringi silmas pidades.

Antud teemakäsitlus on aktuaalne, sest uurimustöö tulemusena on võimalik paremini hinnata erinevate soojustusmaterjalide kasutamist hoonete planeerimisel ning vähendada hoonete ehitamisel energiakulusid ning keskkonnamõjusid tarbimiseelistuste muutmisega optimaalsema lahenduse kasuks.

1. Valdkonna ülevaade

1.1. Energiakasutus ehitussektoris

Energiatõhusad ehitised on olnud 21. sajandil järjest rohkem inimeste tähelepanu all. Tekkinud on ühine arusaam, mille kohaselt peaksid ehitatavad hooned olema energiatõhusad, madala kasvuhoonegaaside heitega ning ehitatud keskkonnasõbralikest materjalidest (Brēmere *et al.*, 2013). Ehitussektor pakub inimestele sissetulekut, töökohta ning elukvaliteeti, kuid seejuures tarbib tohutult ressursse ja energiat, tekitab reostust ja jäätmeid ning mõjutab seetõttu märkimisväärselt kliimat. Ehituses on vaja kolm miljardit tonni toorainet aastas, et toota ehitusmaterjale ning tooteid ja see vastab 40-50%-le ülemaailmsest aastasest materjalikasutusest. Peale selle, et ehitussektor tarbib suure osa ülemaailmsest toorainevarudest, kasutab ehitus ka 12% ülemaailmsest joogiveest ning peaaegu 70% puidutoodetest (Santamouris, 2016).

Ehitussektor moodustab 30-40% maailma energiakasutusest, tehes sektori üheks peamiseks energiakasutajaks. Arvestades ehitusele vajaminevale energiale juurde veel lammutamise oma, siis ehitussektori nõudlus moodustab ligikaudu 50% kogu energiatarbimisest (Santamouris, 2016). Ehitised on varad, mis kestavad kaua ning neid ei asendata või renoveerita tihti. Praeguse ehitamise ja lammutamise kiiruse juures on juba ehitatud 70% hoonetest, kus inimesed elavad aastaks 2050. Ehitustegevuse arv ületab lammutamise ning seega üha rohkem ehitisi vajab soojendamist, jahutamist, ventileerimist. Kuna hoonete varamu kasvab pidevalt, siis seda suuremaks kasvab ka summaarne energiakasutus ning kasvuhoonegaaside heite hulk (Euroopa Komisjon, 2016).

Euroopa hoonefond koosneb 75% eluhoonetest ja 25% mitteeluhoonetest (Buildings Performance Institute Europe, 2011), hoonete kogumahuga 24 miljardit m² (Santamouris, 2016). Nendest 92 miljonit on ühepereelamud (üksikelamu, paarismaja, linnamaja) ning 25 miljonit mitmepereelamud, mis koosnevad paljudest eluruumidest, näiteks korter korterelamus. Ühepereelamutes elavad 58% inimestest ning 42% mitmepereelamutes. Eestis, Lätis ning Hispaanias moodustub mitmepereelamutes elavate inimeste hulk 60% (Csiba *et al.*, 2016). Eestis on eluruumide ehitus olnud kasvutrendis kuuendat aastat järjest ning 2017. aastal lubati kasutusse 5890 uut eluruumi, mis on 1158 eluruumi rohkem kui aasta varem. Eesti ehitusturu ehituse kogumaht on 2017. aastal kasvanud, nii uusehituste kui ka remondi- ja rekonstrueerimistööde osas, võrreldes 2016. aastaga 23% (Statistikaamet, 2018).

Samal ajal pakub ehitussektor ka suurimat võimalust energiatarbimise vähendamiseks, kui hinnata erinevaid konstruktsioonilahendusi juba projekteerimisetapis ja rakendada nendest hoone iseloomu ja asukoha järgi kõige sobivamaid lahendusi (D'Agostino & Parker, 2018). Läbi hoonete ehituselementide, nagu soojustusmaterjalid, on energiatõhususe regulatsioonide tõhustamisega vähenenud energiavajadus hoone kogu eluaja jooksul. Hoone tarindis oleva isolatsioonimaterjali paksuse kasvuga väheneb hoone kasutusfaasis energiatarbimine, kuid kuna soojustusmaterjali toodetakse seetõttu rohkem, siis suuremast materjalikogusest suurenevad ka keskkonnamõju ning maksumus. Seega, on oluline juba hoone kavandamisel leida soojustusmaterjalile optimaalne paksus, et piirata hoone energiatarbimist (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). Seni on peamiselt energia analüüsimisel pandud rõhku operatiivsele energiale ning hoonete elutsükli energiakasutusel on sisendenergia suures osas eiratud olnud. Viimastel aastatel on sisendenergia saamas aga rohkem tähelepanu, sest hoonete operatiivset energiat vähendavad tegevused toimuvad kõrgema sisendenergia arvelt (Azari & Abbasabadi, 2018).

1.2. Hoonete energiatõhususe regulatsioon

1.2.1. Euroopa tasand

Euroopa elamufond on mitmekülgne oma hoonete suuruse, vanuse, energiatõhususe, kütte- ja jahutuse ning energiakandjate valiku poolest. Iseloomulikud on üsna vanad hooned, millest enamus on ehitatud enne 1970. aastat, mistõttu on need hooned ebatõhusamad kui kaasaegsete nõuetega hooned (Csiba *et al.*, 2016). Euroopa riikides nagu Inglismaa, Belgia, Itaalia, Hispaania ning Prantsusmaa on enam kui 60% hoonetest ehitatud enne, kui soojusisolatsiooni regulatsioon oli hoonetes kohustuslik (The European Fuel Poverty and Energy Efficiency study, 2009). Piisav ja nõuetekohane soojusisolatsiooni tase seinas, aknas, põrandas ja katusel võimaldab hoonet kütta ning jahutada energiatõhusamalt ning mida kõrgemad on energiatõhususnõuded, seda väiksemad on kulutused energiatarbimisele. Erinevate kliimatingimuste tõttu on nõuded energiatõhususele Euroopa tasemel väga erinevad. Põhjamaad, kuhu alla kuulub ka Eesti, on välja töötanud väga kõrged standardid vastavalt piirkonnas esinevatele ekstreemsetele külma temperatuuridele (Csiba *et al.*, 2016).

Euroopa hoonete poliittraamistik on aastatega arenenud ning järjest on võetud liikmesriikide poolt kasutusele mitmeid meetmeid hoonete energiatõhususe edendamiseks (Buildings Performance Institute Europe, 2011). Praegu tuginevad peamised Euroopa õigusaktid, mis käsitlevad energiatarbimise vähendamist ehitussektoris, 2010. aastal kasutusele võetud

„Hoonete energiatõhususe direktiivile“ ja 2012. aastal võetud „Energiatõhususe direktiivile“ (Fokaides *et al.*, 2017). Viimane seab Euroopas Liidu eesmärgiks vähendada 2020. aastaks primaarenergiatarbimist 20%, mis tähendab, et energiatarbimine ei tohi ületada primaarenergia puhul 1 474 miljonit naftaekvivalenttonni (Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2012/27/EL, 2012). Energiatarbimise vähendamise eesmärgi täitmist toetab liikmesriikidele kehtestatud kohustus suurendada liginullenergiahoonete arvu. Samuti on eesmärgiks seatud hoonete ja ehitusdetailide kulutõhus tasakaal investeeringute ja hoone olelusringi jooksul kokkuhoitavate energiakulude vahel (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 2010).

Uued ehitised saavad olema kõrge energiatõhususega hooned, kuid olemasolevad ehitised vajavad samuti renoveerimist, et vastata kõrgetele energiatõhususe nõuetele (Csiba *et al.*, 2016). 2012. aastal vastu võetud Energiatõhususe direktiivi kohaselt, peaksid liikmesriigid olemasolevate hoonete energiatõhususe tõstmiseks võtma kasutusele 2020. aastast kaugemale ulatuva strateegia, et teha investeeringuid elamu- ja ärihoonete renoveerimiseks. Strateegia kulutõhusaks renoveerimiseks tähendab remonti, mis vähendab nii hoonele tarnitava energia, kui ka lõppenergia tarbimist märkimisväärse protsendi võrra võrreldes renoveerimiseelse tasemega (Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2012/27/EL, 2012). Käesoleval ajal, on vaja uurida ja hinnata tehnilisi ja majanduslikke võimalusi ning piiranguid, et vähendada energia ja kasvuhoonegaaside heited ning luua tõhusamat energiatõhususe poliitikat. Selleks, jääb puudu aga kogu Euroopa ehitusektorit hõlmavatest andmetest (Buildings Performance Institute Europe, 2011).

1.2.2. Eesti tasand

Eesti eluasemevaldkond on määratletud mitmete õigusaktidega ning riiklike arengustrateegiatega. Eluasemevaldkonna arengu suunamine toimub õigusaktidega, nagu näiteks ehitusseadustik ja Euroopa Liidu energiatõhususe direktiivid ning riiklike arengukavade ja arengustrateegiatega nagu üleriigiline planeering „Eesti 2030+“. Viimases on pööratud tähelepanu, et hoonete soojapidavuse nõudeid tuleb karmistada ning senisest enam panustada liginullenergiahoonete arendamisele (Arjakas & Kurnitski, 2013). Lisaks, seab „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“ Eesti elamumajanduse visiooni, et aastaks 2050 vastab Eesti elamufondist kolmandik liginullenergiahoone energiatõhususarvu ja hoonete sisekliima kehtivatele standartidele väärtusele (Energiamajanduse arengukava aastani 2030, 2016).

Eestis on ehitistele kehtestatud energiatõhususe miinimumnõuetele regulatsioon, mis sätestab hoonetele kohustuslikud sisekliima ning energiatõhususe miinimumväärtused (Kalamees & Arumägi, 2016). „Hoonete energiatõhususe miinimumnõuete“ regulatsiooni kohaselt peavad kõik avalikud hooned pärast 2018. aasta 31. detsembrit vastama liginullenergiahoonele kehtestatud piirväärtusele. Kõik uued ehitatavad hooned peavad vastama energiatõhususarvult liginullenergiahoonetele kehtestatud piirväärtusele pärast 2019. aasta 31. detsembrit (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Hoone kasutusotstarbele vastavalt määratakse energiatõhususarvu [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] piirväärtus, mis liginullenergiahoone tingimustele vastavatel väikeelamutel ei tohi ületada $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ning korterelamutel $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Hoone energiatõhususarv ning eksploatatsiooniks kuluv energia määratakse energiarvutustega, mis tehakse vastavalt hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale, et tõendada energiatõhususe nõuetele vastavus. Arvutustes tuleb lähtuda hoones kasutatavast energiaallikast, mille järgi määratakse kaalumistegurid, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju. Energiatõhususe miinimumnõuete regulatsioonis on näiteks elektri kaalumisteguriks määratud 2,0, maagaasil 1,0 ning kaugküttel 0,9 (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015).

Samal ajal ei käsitle ehitistele kehtestatud energiatõhususe miinimumnõuetele regulatsioon hoone ehitamisel kasutatud materjalide sisendenergiat ja sellest tulenevat energiatõhusust (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015). Ehitusmaterjalide valikuga on võimalik hoone kogu olelusringi energiatõhusust veelgi kasvatada.

Kuni 1995. aastani lähtuti Eestis NSV Liidu ehitusnormidest, mis olid soojapidavuse suhtes vähenõudlikud. Enam kui 90% enne 1995. aastat ehitatud hooneid on liiga vähese soojapidavusega ning seega suure soojakuluga (Masso, 2012). Otstarbekas ja piisav soojustus tagab hoone välispiirde väiksema soojusläbivuse, mis tagab omakorda suurema energiatõhususe taseme. 2015. aastal vastu võetud „Hoone energiatõhususe miinimumnõuete“ määruuses tuleb hoone piirdetarindi valikul lähtuda järgmistest soojusläbivuse piirväärtustest: välisseinal $0,12\text{--}0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, katusel ja põrandal $0,1\text{--}0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ning aknal ja uksele $0,6\text{--}1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015). Lisaks, on kirjeldatud „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale“ määruuses nõudeid ka ventilatsioonile, ruumitemperatuurile, tehno- ja küttesüsteemile. Oluline on sooritada arvutused hoone tüüpilisel kasutamisel, kasutades Eesti energiaarvutuse baasaastat, mis esindab aastate 1970–2000 tüüpilist väliskliimat (Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika, 2015).

1.3. Hoone piirdetarindi soojustamine

1.3.1. Hoone piirdetarind

Hoone piirdetarind mõjutab hoone sisendenergia ning operatiivse energia koguväärtuse hulka, kuna piirdetarindis paiknev soojusisolatsioon ning aknasüsteemid on peamisteks elementideks saavutamaks hoone energiatõhusus (Azari & Abbasabadi, 2018). Hoone tarind moodustab piirde sise- ja väliskeskkonna vahele, mõjutades sellega soojuse, valguse ning õhu levikut läbi hoone. Seetõttu on vaja hoone hoolikalt kavandada, et saavutada hoonel kõrge sooritusvõime (Samuel *et al.*, 2017). Liginullenergiahooned nõuavad ehitamisel kõrget kvaliteeti ning ainult energiatõhusaid tehnoloogiaid ning materjale kasutades on võimalik selleks kohustuslikud nõuded täita (Attia, *et al.*, 2017).

Liginullenergiahoonete kavandamisel on oluline roll isolatsioonimaterjaliga soojustamisel, kuna see vähendab potentsiaalselt ehitise energiavajadust kui ka kasvuhoonegaaside heidet. Tarindi soojustamisel on vajalik leida optimaalne isolatsioonimaterjali paksus, et tasakaalustada materjali paksuse tõstmisest tulenev mõju energia, keskkonna ja majanduslikele aspektidele (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). Hoonete energiatõhususe saavutamiseks on vaja hoonete konstruktsioonelementide soojusjuhtivust piirata. Selline nõue põhineb peamiste hoone piirdetarindi elementide U-arvu väärtusel, mida väljendatakse konstruktsioonidel W/m^2K (Buildings Performance Institute Europe, 2011). Isolatsioonimaterjali võib rakendada kogu hoone ulatuses või siis mõne tarindi osa elemendile, näiteks välisseinale või katusele. Isolatsioonimaterjalid aitavad tasakaalustada ja vähendada soojusülekannet läbi hoone tarindi, vähendades sellega suvist soojuse kasvu ning vastupidi talvel soojuse kadumist (D'Agostino & Parker, 2018).

Hoone piirdetarindid nagu katus, põrand ning sein mõjutavad suuresti hoone energiavajadust. Hoone küttevajaduse vähendamiseks on vaja katusele paigaldada paksemalt isolatsioonimaterjali võrreldes seina ning põrandaga (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). Katuse soojustamise olulisus on kasvanud, kuna keskmiselt kuni 60% soojuslikest kadudest toimub läbi katuse (Sadineni *et al.*, 2011). Määrates optimaalse soojustusmaterjali koguse seinakonstruktsioonis saab vähendada soojusülekannet läbi konstruktsiooni (Kaynakli, 2012). Välisseina soojusisolatsioonisüsteem on moodustatud erinevatest kihtidest, millest soojusisolatsiooni materjal on peamiseks elemendiks (Tingley *et al.*, 2015). Külmas kliimas eelistatakse hoonetel eelkõige madala soojusläbilaskvusega mitmekihilisi seinu, millel on paksem soojustusmaterjali kiht. Sellise seinatüübi valikul on võimalik säilitada kauem soojust

ning vähendada sellega küttekulusid (D'Agostino & Parker, 2018). Soojustusematerjali paigaldamisel soovitakse võimalikult palju kulusid säästa, kuid soojustusest tulenevat mõju peetakse keskkonnale sageli tähtsusetuks (Tingley *et al.*, 2015).

1.3.2. Soojustusmaterjalid piirdetarindis

Optimaalse soojustusmaterjali paksuse valik oleneb sellest, mis tüüpi isolatsioonimaterjaliga on tegu, millised on isolatsioonimaterjali soojuslikud omadused, milline on selle materjali tootmine ning mis kliimavööndisse materjal paigaldatakse (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). Isolatsioonimaterjale toodetakse erinevatest toorainetest ja erinevatesse vormidesse. Materjal võib esineda näiteks rullina, jäiga plaadina, pihustatud kujul või konstruktsiooni süstitavana vahtmaterjalina (Dodoo *et al.*, 2014). Euroopas moodustab anorgaaniline kiuline isolatsioon nagu klaasvill ja kivivill peamise osa isolatsioonimaterjalide turust (60%). Lisaks on suuremas mahus esindatud ka orgaanilised vahtmaterjalid, nimelt laiendatud (EPS) ja pressitud (XPS) polüstüreen ja polüuretaan (PUR), mis moodustavad 27% turust (Azari & Abbasabadi, 2018). Kuna tootmisprotsessid määravad suures osas materjali valmistamiseks vajamineva sisendenergia hulga (Dodoo *et al.*, 2014), siis allpool on toodud mõne rohkem esindatud tööstusliku soojustusmaterjali tootmise lühikirjeldus.

Kivivilla tooraine tootmiseks on vaja basalti, dolomiiti ning lubjakivi. Tooraine sulatatakse ning seejärel valatakse koos sideainetega kiududeks, et saavutada vajalik tihedus ja struktuur. Pärast toodete kuivatamist lõigatakse need vajalike suuruste ja kujuga pakendamiseks ja tarnimiseks (Dodoo *et al.*, 2014).

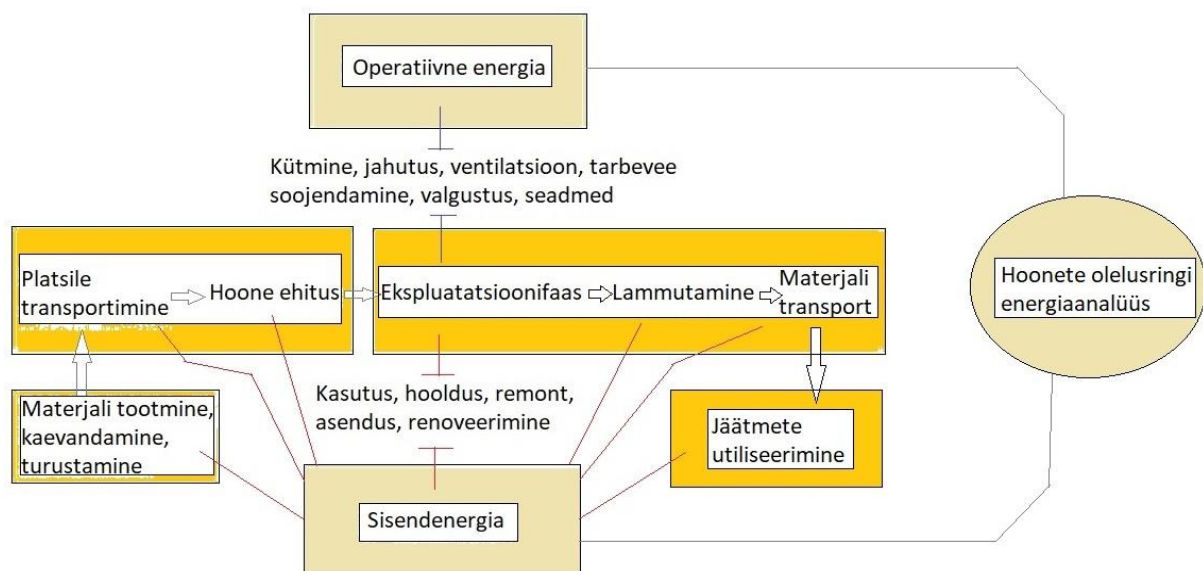
Üldiselt sarnaneb klaasvilla tootmisprotsess kivivilla tootmisega, välja arvatud see, et toormaterjalideks on liiv ja klaas ning vähesel hulgal teisi mineraale, nagu lubjakivi ja naatriumkarbonaat (Dodoo *et al.*, 2014). Klaasvilla termilised omadused on sarnased kivivilla omadustega (Schiavoni *et al.*, 2016).

Laiendatud polüstüreeni (EPS) toodetakse kuni 40 korda paisunud tahketest polüstüreengraanulitest, mis on kuuma veeauru abil jäigaks plastvahuks kokku ühendatud. Seejärel, graanulid vormitakse ja lõigatakse vajalikul kujul ja suurustega (Dodoo *et al.*, 2014). Neid kasutatakse tavaliselt paneelina, mida saab hõlpsalt käsitseda ja lõigata, ilma et materjal kaotaks oma jõudlust (Schiavoni *et al.*, 2016).

1.4. Hoonete ja materjali energiaanalüüs

1.4.1. Hoonete energiaanalüüs olelusingis

Hoonete olelusingi energianalüüs on üksikasjalik lähenemisviis, et hinnata kõiki energia sisendeid, väljundeid ning vooge läbi terve hoone elutsükli (joonis 1). Olelusingis tarbitava koguenergia teada saamiseks peab energiaanalüüsi süsteemi piirides hõlmatud olema nii operatiivne energia kui ka sisendenergia (Chastas *et al.*, 2016).



Joonis 1. Süsteemi piirid, sisendid väljundid ja vood hoonete olelusingi energianalüüsis (Chastas *et al.*, 2016).

Hoone olelusingi võib omakorda jagada neljaks osaks (Giordano *et al.*, 2017). Operatiivne energia (*operational energy*) arvestab hoone kütmiseks, jahutamiseks, ventilatsiooniks, tarbevee soojendamiseks, valgustuseks ning erinevate majapidamisseadmete vaja läinud primaarenergia tarbimise hulka. Sisendenergia (*embodied energy*) on primaarenergia hulk, mis on vajalik materjalide kaevandamiseks, nende tootmiseks ja turustamiseks, samuti materjalide transportimiseks ehitusplatsile ning hoone ehitamiseks. Korduv sisendenergia (*recurring embodied energy*) hõlmab terve hoone eluaja jooksul hoone kasutamiseks, hoolduseks, remondiks, renoveerimiseks ja materjalide ja tehnosüsteemide asendamiseks kulunud energiatarbimist (Chastas *et al.*, 2016). Elu lõpu sisendenergia (*end-of-life embodied energy*) hõlmab hoone lammutamise, lammutamisest tekkinud materjali transporti ja nende kasutuselt kõrvaldamise primaarenergia (Giordano *et al.*, 2017).

Möödukas või külmas piirkonnas ehitatud ehitistes peetakse olelusringi energiatarbimise peamiseks osaks ekspluatatsioonifaasi. Samuti eeldatakse, et hoonete lammutamiseks ja renoveerimiseks kasutatav energia on väike ja seetõttu on see tihti hoonete elutsükli energiaanalüüsist välja arvatud (Gustavsson & Joelsson, 2010). Põhja- ja Kesk-Euroopa riikides asuvates traditsioonilistes hoonetes, moodustab materjalide sisendenergia ligikaudu 10-20%, kasutusetapil on energiatarbimine 80-90% ja vähem kui 1% kulub energiale lõppetapis, kui toimub kasutuselt kõrvaldamine (Bribián *et al.*, 2011). Materjalide turustamisel kulub teatud hulk energiat transpordile (Miljan, 2012). Transpordi osakaal kogu olelusringi sisendenergia hulgast moodustab üle 6% (Dixit, 2017). Materjalide transpordi sisendenergia hulka pole paljudes uuringutes kasutatud, sest see varieerub suurel määral, nimelt kasutatakse erinevaid sõidukeid, erineb kütusekulu, teekonnapiikkus jne (Miljan, 2012).

Hoonete energiaanalüüsi teostamine toimub tavalise praktika kohaselt 30-50. aastase perioodi jooksul (Sartori *et al.*, 2008). Sageli seatakse hoonete kasutuseaks just 50 aastat (Grant & Ries, 2013). Selline periood on tavaline, sest eeldatakse, et pärast sellist ajavahemikku hoone lammutatakse või tehakse olulisi remonditöid, mis muudavad omakorda hoone energiakasutust (Sartori *et al.*, 2008). Ehitise kasutusetapis tehtu mõjutab energiatarbimist. Mida suurem on hoone kasutusiga, seda rohkem tuleb teha remonttöid või materjali väljavahetusi, mis tulemusena suurendab omakorda ekspluatatsioonifaasis kulunud energiatarvet. Teisest küljest, võib lühemast hoone kasutusajast tingituna, tekkida vajadus hoone kiiremini asendada, mis suurendab aga esialgset sisendenergia nõudlust teatud ajavahemikul (Rauf & Crawford, 2015).

1.4.2. Materjalide energiaanalüüs olelusringis

Ehitismaterjalidel on tähtis roll hoonete ehitamise ning kasutamise energiahulga vähendamisel. Materjalide valimisel on määravaks, kui suur on nende energiamahukus ning seda tuleks arvestada juba hoone projekteerimisel (Miljan, 2012). Materjali sisendenergia sisaldust on võimalik leida hällist-värvani meetodil (*cradle to gate*) ning hällist-platsile meetodil (*cradle to site*) ning hällist-hauani meetodil (*cradle to grave*) (Dixit, 2017).

Hällist värvani meetod võtab arvesse kulunud sisendenergia tooraine kaevandamisest kuni tootmise ning pakendandatud toote turustamiseni. See meetod välistab energiakulu materjalide transportimiseks ehitusplatsile või jaemüügikauplusesse (Dixit, 2017). Seega, on hällist-värvani meetodiga võimalik materjali sisendenergiat kasutada, olenemata objekti asukohast, sest arvestatakse tehases kulunud energiat ning transpordile kulunud energia saab vajadusel juurde liita (Miljan, 2012).

Hällist-platsile meetod hõlmab kõiki energiakulusid kuni materjali ehitusplatsile jõudmiseni (Miljan, 2012).

Hällist hauani meetod arvestab lisaks hällist-platsile meetodi tegevusprotsesside sisendenergiale juurde veel ehitustegevuse, hoolduse, remondi, renoveerimise protsesside sisendenergia. Samuti, hõlmab see meetod ka elu lõpu sisendenergia, mis kulub lammutustööde, jäätmete sortimise ja vedamise, korduskasutuse ja ringlussevõtu ning materjalide kõrvaldamise protsessidele (Dixit, 2017).

1.5. Ülevaade kirjandusest

Kirjanduses on olemas ulatuslik ülevaade erinevate hoonete ning ehitusmaterjalide olelusringi analüüsist. Uuritud on hoonete sisendenergia ja operatiivse energia tarbimist hoone olelusringi kasutusperioodi jooksul ning kuidas see muutub, kui muuta hoone tarindis erinevaid ehitusmaterjale.

Olelusringi operatiivne energia on leitud olevat suurem, kui hoone kogu olelusringi jooksul tarbitav sisendenergia hulk (Monteiro *et al.*, 2016). Uuringud näitavad aga, et hoone olelusringi koguenergia tarbimises on sisendenergia hulk suurenenud, mida seostatakse eelkõige energiatõhusate hoonete järjest suurema kasutuselevõutuga (Copiello, 2016). Sartori ja Hestnes (2007) järeldasid, et sisendenergia hulk võib konventsionaalsel hoonel kogu olelusringi energiatarbimisest moodustada 2-38%, kuid madalenergiahoonel on see vahemikus 9-46% (Hestnes & Sartori, 2007). Chastas *et al.* (2016) tegi 2016. aastal ülevaate 90 (sh madalenergia ning liginullenergiahooned) hoone olelusringist, mis näitas, et sisendenergia moodustab madalenergiahoonetel (26-57%) ning liginullenergiahoonetel (74-100%), kogu hoone olelusringi tarbitavast energiast (Chastas *et al.*, 2016).

Madalenergia hoone näite põhjal näitas Thormark (2002), et hoolimata sellest, kui operatiivne energia madalenergia hoonel olulisest väheneb, võib hoone energiakulu 50-aastase elutsükli vältel olla suurem kui konventsionaalsetel hoonetel, sest ehitamisel kasutatakse rohkem materjali. Kui asendada konventsionaalsed materjalid taaskasutatavate materjalide vastu, siis madalenergia hoone sisendenergia väheneb 37-42% võrra ning saavutab parema energiatõhususe kui tavapärane hoone (Thormark, 2002). Rauf ja Crawford (2015) on järeldanud, hoone eluajal toimuvate hooldus- ja remonttööde uurimisest, et ehitusmaterjalide ja -komponentide väljavahetamisega seotud operatiivset energiat mõjutab otseselt

ehitusmaterjalide ja hoonete endi kasutusiga (Rauf & Crawford, 2015). Selgunud on, et ligi 12% kasutatavast energiast on seotud hooneosade hoolduse ja asendamisega (Thormark, 2002).

Dixit (2017) on leidnud, et sisendenergia ning operatiivse energia osakaal sõltuvad paljudest teguritest nagu asukoht, kliima ning kütuseallikas, mistõttu neid ei saa üldistada ning seeõttu oleks kõige optimaalsem lahendus neid koos analüüsida, mitte eraldi (Dixit, 2017).

Erinevate välisseinte isolatsioonisüsteemide mõju sisendenergia tarbimisele on muuhulgas uuritud Rootsis. Uuringus kasutatud hoonete seintes muudeti isolatsioonimaterjale nagu kivivill, klaasvill ja vahtpolüstüreen (EPS) ning nende paksust, et saavutada hoonetel samasugune välisseinte energiatõhusus vastavalt erinevatele nõuetele. Leiti, et samasuguse energiatõhususe taseme saavutamiseks hoones kulub kivivillale sisendenergiat kuni 17% vähem kui klaasvillale ja EPS isolatsioonile (Tettey *et al.*, 2014).

2. Materjal ja metoodika

2.1. Uuritav hoone

Käesoleva töö uurimisobjekt on autori poolt projekteeritud väikeelamu hoone. Väikeelamu projekteeriti, sest nende ehitamine on ajakulult kaks kuni kolm korda väiksem, kuna hoone on lihtsa kuju ning konstruktsioonidega (Just & Just, 2016). Projekteeritud ühekorruselise väikeelamu eluruumide pindala on 116 m². Väikeelamu arhitektuuriline risttahuka kuju tuleneb hilisemast energiatarbe analüüsimise vajadusest, mida tehakse programmiga BV². Avalikult kättesaadav programm suudab arvutada vaid risttahuka kujulist hoonet (Kurnitski et al., 2016). Väikeelamu (tüüphoone 1) joonised on välja toodud lisa 1. Hoone põhjapoolsel küljel on planeeritud sissepääs hoonesse (Lisa 1, joonis 1) ning lõunapoolsel küljel on avar terrass (Lisa 1, joonis 2). Hoones on 10 ruumi, mille täpse paigutuse ning suurused leiab asendiplaanilt (Lisa 1, joonis 3). Hoone kandekonstruktsiooniks on tarbijate seas populaarne plokksein ning hoone välisviimistluses on kasutatud pikaelist telliskivi fassaadimaterjali. Hoone siseviimistluses kasutatud krohvi või on plaaditud pinnad. Hoonel on lamekatus, mille kattematerjaliks on kahekordne rullmaterjal (TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017). Hoone piirdetarindite valikul lähtuti sobivusest liginullenergiahoonetesse (TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017), millest täpsem konstruktsioonide ning erinevate materjalikihi paksuste ülevaade on toodud tüüphoone 1 näitel Lisas 2.

Uuritav väikeelamu koosneb muutuvatest ja mittemuutuvatest tarindikonstruktsioonidest. Mittemuutuvad konstruktsioonid on põrand, vundament, siseseinad ja seinavataited. Muutuvad hoone tarindikonstruktsioonid on seinad ning katuslagi. Muutuvates konstruktsioonides muudetakse soojustusmaterjali tüüpi ning kihi paksust. Hoone tüüplahendustes on kasutusel kivivill, klaasvill ning EPS soojustusmaterjalid. Erinevate materjalikihtide mahu leidmiseks hoonetarindites, tuli materjalikihtide paksus ja materjali kasutuses olev tarindi pindala korrutada (pindalast oli eelnevalt maha arvatud avatäidete pindalad). Saadud tulemus korrutati omakorda materjali tihedusega, millega saadi teada materjali mass. Soojustusmaterjali kihtide paksust on varieeritud ja tulemused on arvatud seinas 0,2 m, 0,25 m, 0,3 m paksusele ning katuslaes 0,3 m, 0,4 m ning 0,5 m paksusele.

Akende osakaal fassaadist on 16,2% ning ukсед moodustavad 3,8%. Hoone aknad ja ukсед on kavandatud puitraamidega ning kolmekordse klaaspaketiga. Akende soojuslähivus on hoones

$U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ning hoone välisused on kavandatud soojuslähivusega $U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Akendele spetsiaalseid päikesevarjestuslahendusi (nt sirmid) ette nähtud ei ole.

Kavandatud hoones on soojusallikaks maasoojuspump. Hoones kasutavaks küttesüsteemiks on radiaatorküttesüsteem. Ventilatsioonisüsteem on tehtud soojustagastusega. Aktiivseid jahutussüsteeme ei ole hoonesse ette nähtud ning samuti ei kasutata taastuenergiaallikaid kasutavaid süsteeme.

2.2. Kasutatavad tööriistad

2.2.1. Revit 2018

Käesolevas töös kasutati hoone projekteerimisel Revit 2018.3 programmi. Programm võimaldab ehitusinformatsiooni modelleerimist (BIM). See annab võimaluse ideed üle viia kontseptsioonist ehituseni, mudelipõhise lähenemisviisi abil. Projekteerides hoone, on selle süsteeme ja konstruktsioone võimalik analüüsida, kui muuta ehitise arhitektuuri, konstruktsiooni osa ja erisüsteeme. Programm on tudengitele, õppejõududele ning haridusasutustele registreerimisel tasuta kättesaadav Autodeski kodulehel (Autodesk Revit, 2018).

2.2.2. BV²

Hoone energiakulu analüüsimiseks kasutatakse BV² programmi, mis võimaldab hoonete energiatarbe ja sisetemperatuuri simuleerimist. Programmis on sisekliima simuleerimise aluseks Eesti baasaasta kliimaatilised andmed, mida energiatõhususe miinimumnõuete täitmise tõendamiseks tuleb kasutada.

BV² programmi saab kasutada, et arvutada energiatõhususe arvu. Arvutuste tegemiseks tuleb programmis sisestada vajalikud andmed. Programmis saab sisestada hoone välispiirete andmeid, sealhulgas koostada kihtidest erinevaid seina- ja katusekonstruktsioone soojusjuhtivuse (U-väärtuse) arvutamiseks. Lisaks hoone tarindi andmetele, on võimalik sisestada vabasoojuse-, kütte-, ventilatsiooni- ning jahutuseandmed, elektri lisatarbijate- ja soojavarustussüsteemiandmed jne. Andmed sisestatakse hoone sisemõõtude järgi ning tuleb arvestada, et energiatarbimine arvutatakse kogu hoonele korraga. Programm on vabalt kättesaadav Eesti Vabariigi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi kodulehel (CIT Energy Management AB, 2007).

Energiaarvutuses ei eeldata hoonete detailset tsoonideks jagamist ning väikeelamuid ja ühe kasutusotstarbega hooneid võib arvutamisel käsitleda ühe tsoonina (Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika, 2015). BV² programmi kasutamise analüüsimisel on selgunud, et programm suudab arvutada ainult risttahuka kujulist ühe tsooniga hoonet ning keerukama arhitektuuriga ja mitme kasutusotstarbega hooneid tuleb oluliselt lihtsustada (Kurnitski *et al.*, 2016).

2.3. Energiatarbimise määramine olelusingis

2.3.1. Uurimuse käsitusala

Käesoleva uurimuse eesmärk oli uurida hoonete energiatarbimise muutust, kui kasutada piirdetarindites erinevaid isolatsioonimaterjalide ja nende paksusi ning hinnata, milline on muutus 50-aastase hoone eksploatatsiooniperioodi jooksul. Uurimuse tulemusena selgitatakse välja hoonete ja materjalide operatiivse energia ja sisendenergia hulk ning selle muutus 50-aastase hoone eksploatatsiooni perioodi jooksul. Samuti selgitatakse välja, kuidas muutub hoonete summaarne sisend- ja operatiivne energiatarbimine, kui suurendada soojustusmaterjali kihti piirdetarindis ning kuidas muutub summaarne sisend- ja operatiivne energiatarbimine, kui kasutada erinevaid soojustusmaterjale. Vastavalt sellele selgub, millise soojustusmaterjali kasutamine on energeetiliselt kõige kasulikum.

Uurimustöös muudetakse hoone piirdetarindis soojustusmaterjale nagu kivivill, klaasvill ning vahtpolüstürool (EPS) ja nende paksusi, samal ajal säilitades ülejäänud hoone konstruktsiooni parameetrid muutumatuna. Kokku uuritakse kolme erineva soojustusmaterjali ja iga soojustumaterjali puhul 3 erineva soojustusmaterjali paksusega tüüphoonet, kus on muudetud katuslae- ning seinatarindi soojustusmaterjale. Tüüphoon 1 sein ja katuslae soojustusmaterjali kiht moodustab 0,2 m seinakonstruktsioonis ja katuslaes 0,3 m. Tüüphoon 2 soojustusmaterjali paksus seinatarindis on 0,25 m ning katuslae tarindis 0,4 m. Tüüphoon 3 seinatarindis on soojustusmaterjali 0,3 m ja katuslaes 0,5 m. Kõigile tüüphoonete tarinditele on määratud U-arv (Lisa 3, tabel 1 kuni tabel 7).

Käesolevas uuringus projekteeritud hoone elueaks seati 50 aastat. Hoone olelusingi energiaanalüüsis võeti arvesse operatiivset energiat hoone eksploatatsiooniperioodi jooksul, mille põhjal määratakse energiatõhususarvuga hoone energiatarbimine. Hoone

konstruktsioonide sisendenergia arvutati hällist-väravani meetodil, kuna selle meetodiga saab igaüks ise transpordi kulud materjali sisendenergiale vajadusel juurde arvestada.

Hoone energiaarvutustes ei arvestata hoone külmasildadega kuna võeti eeldus, et maja on ehitatud külmasildade vabalt. Samuti ei arvestata energiaarvutustes erinevaid kinnitusi, segusid (nt müürisegu), siseviimistluseks kulunud energiat, samuti hoone väljaulatuvaid objekte nagu trepid ning terrass. Lisaks, ei arvestata veel avatäidetele (uksed ja aknad) ning tehnosüsteemidele kulunud sisendenergiat. Seda seetõttu, et eelpool nimetatud mitte arvestatud hoone osad on kõikide tüüphoonete puhul sisuliselt identsed.

2.3.2. Operatiivne energia ja materjalide sisendenergia

Operatiivne energia ning sisendenergia põhinevad mõlemad primaarenergia nõudluse hulgal. Sisendenergiat, kus on arvestatud materjali kaevandamist, tootmist ja turustamist, arvestatakse kohe pärast ehitusetappi, alates hoone kasutusfaasi 0 aastast. Operatiivne energia akumulereub, aga terve hoone kasutusfaasi jooksul. Operatiivset energiat mõõdetakse köetava pinna ruutmeetri kohta [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$], kuid sisendenergiat arvestatakse materjali kogumassina hoone konstruktsioonis (kWh/kg või MJ/kg). Seega tuleb, sisendenergia ning operatiivse energia väärtused ühtlustada (Giordano *et al.*, 2017).

Hoone operatiivse energiakulu teadasaamiseks 50 aasta jooksul (Lisa 4) korrutas töö autor eelnevalt BV² programmiga saadud tüüphoonete erinevad energiatõhususarvud [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 50-ga, mis tähistab hoone 50. aastast kasutusperioodi. Seejärel korrutati saadud tulemus omakorda väikeelamu eluruumide pindalaga 116 m², mis andis tulemusena operatiivse energiatarbimise hoone kasutusperioodil 50. aasta jooksul.

Lähteandmed materjali sisendenergia jaoks on kogutud peamiselt ICE andmebaasist (Circular Ecology, 2018) kui ka tootjate poolt esitatud andmetest (Lisa 5). Summaarse kogu hoone ehitamiseks kuluva materjali sein ja katuslae sisendenergia (Lisa 6, tabel 8 kuni tabel 13) arvutamiseks tuli autoril korrutada materjalide kihipaksused (m) vastavalt, kas välisseina või katuslae pindalaga (m²), millest oli eelnevalt maha arvatud avatäidete pindalad (m²). Saadud tulemus oli materjali maht (m³), mis omakorda materjali tihedusega (kg/m^3) korrutades andis materjali massi (kg). Saadud materjali mass (kg) korrutati materjali sisendenergiaga (MJ/kg) – tulemuseks summaarne kogu hoone peale kuluv sein ja katuslae materjali sisendenergia (MJ). Viimaks, et operatiivne energia ning sisendenergia oleks samas ühikus, pidi arvutama

veel sisendenergia väärtuse megadžaulidest (MJ) ümber kilovatt-tund (kWh) energiaühikuks, arvestusega, et 1 kWh = 3,6 MJ.

2.3.3. Piirdetarindi soojusläbivuse (U-arv) arvutamine

Ehitusmaterjalide valik määrab hoone tarindi soojusvahetuse väli- ja sisekeskkonna vahel ja on tihti iseloomustatud U-arvu kaudu. Madalam U-arv viitab paremale soojusisolatsioonile (Csiba *et al.*, 2016). Energiatõhususe arvu ning energiatarbimise arvutamiseks koguti esmalt lähteandmed, mis on seotud piirdetarindi soojusläbivuse arvutamisega. Selleks on vaja detailselt teada hoone tarindikihtide materjale ja nende paksusi (Lisa 2, tabel 1) ning materjalide soojuseri juhtivust (Lisa 3, tabel 1 kuni tabel 7).

Piirde soojusläbivus on arvutatav valemist $U = \frac{1}{R_{tot}}$, kus R_{tot} on piirde soojustakistuste summa ($m^2 \cdot K$) / W (EVS 908-1:2016, 2016). Piirde soojusjuhtivus U arvutustulemus ümardatakse kahe kohani pärast koma (Tark & Kalamees, 2012). Käesolevas uurimustöös ümardati piirde soojusläbivused ka kolme kohani pärast koma, et tuua paremini esile soojustusmaterjalide ning kihtide paksuse erinevustest tulenevad U- arvu muutused.

Soojustakistus on arvutatav valemist $R = \frac{d}{\lambda}$, kus d on kihi paksus ning λ on materjali soojuseri juhtivus W/(m · K) (EVS 908-1:2016, 2016). Materjali soojuseri juhtivuse arvestamisel on kivivill ja klaasvill soojustusmaterjalidel seinakui ka katuslaetarindis samasugune materjali soojuseri juhtivus, kuid EPS materjali korral kasutati soojuseri juhtivuse info olemasolu tõttu seinas ja katuslaes erinevat soojuseri juhtivuse arvu.

Piirdetarindi soojusläbivuse arvutamisel arvestatakse ka piirdetarindi sise- ja välispinna soojustakistusega (EVS 908-1:2016, 2016). Soojustakistused sise (R_{si}) - ja välisküljel (R_{se}) tähendavad, et piirdetarindi välimine kiht piirneb välisõhuga ja sisemine kiht siseõhuga ning need tuleb piirdetarindi U-arvule juurde liita (CIT Energy Management AB, 2007). R_{si} on lael 0,10; seinal 0,13 ja põrandal 0,17. R_{se} on nii lael, seinal kui ka põrandal ühtemoodi 0,04 (EVS 908-1:2016, 2016).

2.3.4. Energiatõhususe arvutamine

Hoone olelusringi operatiivse energia tarbimise hulga määramiseks viidi läbi energiatoõhususe simulatsioon programmis BV². Programmisiseses käsiraamatus on toodud täpsed juhised koos selgitustega, kuidas kõiki protsesse arvestada, et hinnata hoone energiatarbimist (CIT Energy

Management AB, 2007). Hoonete simulatsioonis võrreldi sein- ja katusekonstruktsioonide soojustusmaterjali ning materjalikihtide paksuse erinevustest tulenevaid muutusi hoone energiatarbimisele. Energiatarbimise muutuja komponent oli soojustusmaterjal ja vastavalt selle muutmisest muutuv tarindi soojusläbivus. Energiasimulatsioonis muudeti võrreldavate tüüphoonetel ainult soojustusmaterjali erinevusest ja paksusest tingitud soojusläbivuse arvu, ülejäänud komponendid jäeti tüüphoone 1 (Lisa 2) näitel määratud tasemetele. Saadud tulemust võrreldi esialgse hoone energiatarbimisega.

Energiatõhususarvu määramiseks ning energiatarbe analüüsimiseks võimaldab BV² programm valida hoone Eesti baasaasta kliimaatilised andmed. BV² programmis tuli esmalt valida tüüphooneks elamu, mille andmeid enda jaoks sobivaks saab muuta. Programm arvutab ja arvestab hoone sisemõõte, seega tuli sisestada, et hoone on ühekorruseline põrandapinnaga 116 m², sisemahuga 272,13 m³ ning kõrgusega 2,346 m.

Lisaks, tuleb hoone konstruktsioon valida massiivseks, kuna tegemist on betoonhoonega. Hoone sisemass on määratud aga keskmiselt massiivseks, mis tähendab, et hoonel on massiivse sisemassi tunnuseid, nagu fibo plokk betoonist siseseinad, kuid ka kerge sisemassi tunnused, nagu avatud planeering ja soojustatud põrand ja katuslagi. Edasi tuli määrata väliseinte ning teiste parameetritele nagu avatäited, katuslae ning põranda pindalad ning U-arvud (Lisa 3, tabel 1 kuni tabel 7). Viimaks, tuleb märkida, et hoone lõunakülg paikneks lõunasse, seega on märgitud programmis sealse lahtri sisendväärtuseks 0.

Ühe osana tuleb määrata ka hoone aastane õhufiltratsiooni hulk, mida märgitakse õhuvahetuse kordarvuna (õhuvahetus tunnis) 1/h. Õhuvahetuse kordarv arvutati valemiga $n = \frac{q_{50} \cdot A}{V_{kubatuur} \cdot x} = \frac{6 \cdot 348,08}{272,13 \cdot 35} = 0,22 \text{ (1/s)}$ kus,

õhuvoolu hulk q_{50} on uue väikeelamu hoone korral 6 m³/(m²·h), hoone välispiirde (sealhulgas põranda) sisepindala A on 346,7 m², hoone sisemine maht ehk $V_{kubatuur}$ on 272,13 m³ ning tegur x vastab ühekorruselise hoone puhul arvule 35 (Hoone energiatarbimise arvutamise meetodika, 2015). Hoone õhuvahetuse kordarv on seega 0,22 1/s.

Energiatõhususarvu teadasaamiseks tuli samuti märkida vabasoojus valgustusest, inimestelt ning seadmetest. Väikeelamute puhul on BV² programmis loodud sellejaoks standartne kasutusprofiil koos kellaaegade ja võimsustega elamu pinna kohta (CIT Energy Management AB, 2007).

Peale väikeelamute netoenergiavajaduse ($25 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$) määramist sooja vee tarbimisele (Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika, 2015), arvutas programm sooja vee aastaseks tarbimiseks 45 m^3 . Samuti tuli valida seadmed kütteks ning ventilatsiooniks. Hoone kütmiseks ja sooja tarbevee soojendamise jaoks valiti maasoojuspump ning ventilatsiooniks soojustagastusega sundventilatsioon. Lisaks valiti ka hoones elektrit tarbivad seadmed, mille võimsuseks on $0,07 \text{ kW}$. Võimsus määrati programmi kasutusjuhendi alusel (CIT Energy Management AB, 2007).

3. Tulemused ja arutelu

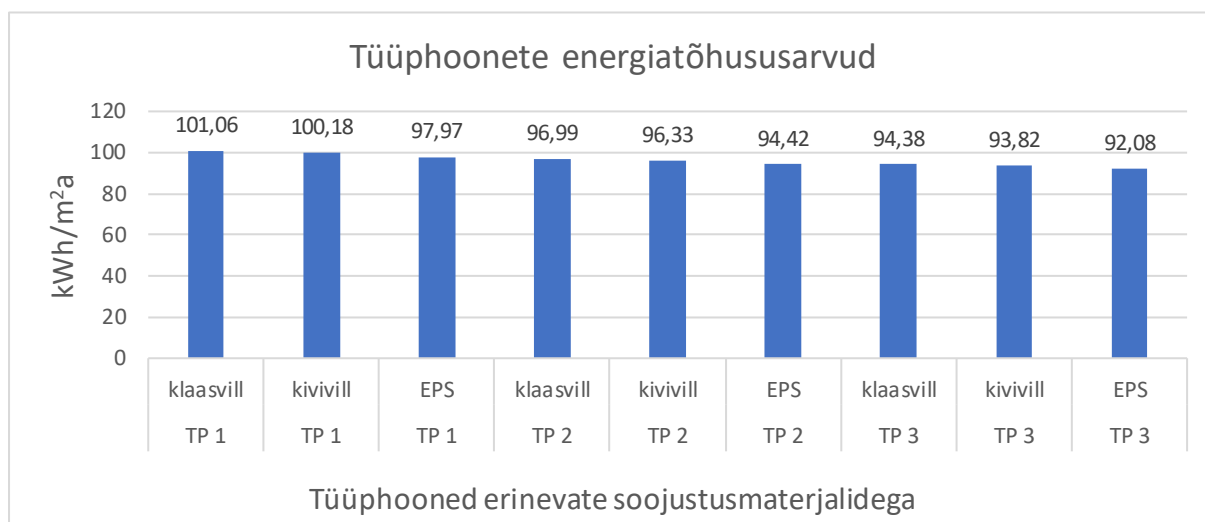
Hoonete energiatarbimise uurimise tulemusena saadi vastused nii seinale kui ka katuslaetarindile erinevatele materjalikihtide sisendenergiale ning neid arvestati tarindilise summaarse materjali sisendenergia leidmisel koos. Selgus ka hoonete energiatõhususarv ning summaarne operatiivse energia hulk 50-aastase hoone kasutusperioodi jooksul. Tulemused varieerusid, kuna tüüphoonetes kasutati kolme erinevat soojustusmaterjali ning erinevaid materjali paksusi. Seega, sai võrrelda hoone energiatarbimise muutumist, kui kasutatakse erinevaid soojustusmaterjale ning kui muuta soojustusmaterjali kihti seinale ja katuslaetarindis paksemaks.

3.1. Tüüphoonete energiatõhususarvud

Uuritud hoonetele määrati energiatõhususarvud (Lisa 4) programmiga BV², millega teostati energiatõhususarvu arvutus kõikidele tüüphoonetele, kombineerides tarindilahenduste soojusläbivusi, mis tekkisid materjalitüübi ning materjali kihi paksuse erinevatest kombinatsioonidest. Selgus, et kõik projekteeritud tüüphooned vastavad madalenergiahoone tasemele (joonis 2), sest nende energiatõhususarv ei ületa 120 kWh/(m²·a) piirväärtust (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015). Tegemist on loodetud tulemusega, sest hoonete projekteerimisel lähtuti erinevatest liginullenergiahoonete projektidest (Timbeco Woodhouse OÜ, 2018; QP Arhitektid OÜ, 2018) ja juhendmaterjali näpunäidetest (TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017), mis peaksid tagama, et uuritud tüüphooned saavad olema ehitatud energiatõhusalt ning parima võimaliku ehituspraktika kohaselt. Samuti ei kasutata hoonetes lokaalse elektri tootmist taastuvast energiaallikast, mistõttu ei saanud eeldada liginullenergiahoone energiatõhususarvu saavutamist, mis on väikeelamul mitte suurem kui 50 kWh/(m²·a) (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015). Nimelt, liginullenergiahoonete energiavajadus on tagatud taastuvatest energiaallikatest toodetud energiaga, sealhulgas taastuvatest energiaallikatest toodetud energiaga kohapeal või selle läheduses (Kalamees & Arumägi, 2016).

Uuritud tüüphoonete kõige energiatõhusama hoone energiatarbimine on 8,98 kWh/m²a võrra väiksem kui kõige kehvema energiatõhususega tüüphoone. See tähendab, et soojustusmaterjali vahetades ning soojustusmaterjalile paksust lisades võib parandada hoone energiatõhusust 9,8% (joonis 2). Kõige kehvema energiatõhususega hooned, kõikide uuritud tüüphoonete lahenduste korral, on klaasvill soojustusmaterjaliga ehitatud. Tüüphoone 1 klaasvillmaterjaliga

hoone energiatõhususarv on 101,06 kWh/m²a, mis on tüüphoonete võrdluses kõige kõrgem. Kivivill soojustusmaterjaliga hooned on energiatõhuselt klaasvill soojustusmaterjalidega hoonetega lähedased, kuid pisut energiatõhusamad. Klaasvilla ja kivivilla tüüphoonete võrdluses on maksimaalne erinevus hoone energiatarbimises 0,88 kWh/m²a ja minimaalne 0,56 kWh/m²a. Kõige energiatõhusam lahendus on kasutada, kõikide tüüphoonete võrdluses, EPS soojustusmaterjaliga tüüphoonet 3, mille energiatõhususarv on 92,08 kWh/m²a.



Joonis 2. Tüüphoonete energiatõhususarvud. (Tüüphoon 1 soojustusmaterjali kiht on 0,2 m seinakonstruktsioonis ja katuslaes 0,3 m. Tüüphoon 2 seinatarindis on soojustusmaterjali 0,25 m ning katuslae tarindis 0,4 m. Tüüphoon 3 seinatarindis on soojustusmaterjali 0,3 m ja katuslaes 0,5 m).

3.2. Seina ja katuslaetarindi materjalide sisendenergia

Seinatarindi kõikide materjalikihtide sisendenergia uurimisel selgus (joonis 3), et kõige suurem sisendenergia on telliskividel. Hoonete telliskivivoodri sisendenergia moodustab 43056 kWh, mis on üle 50% suurem sisendenergia, kui suuruselt järgmisel tarindimaterjalil, milleks on 0,3 meetri paksune EPS soojustusmaterjal. Kõige väiksema sisendenergiaga materjal on krohv, mille sisendenergia on 316 kWh.

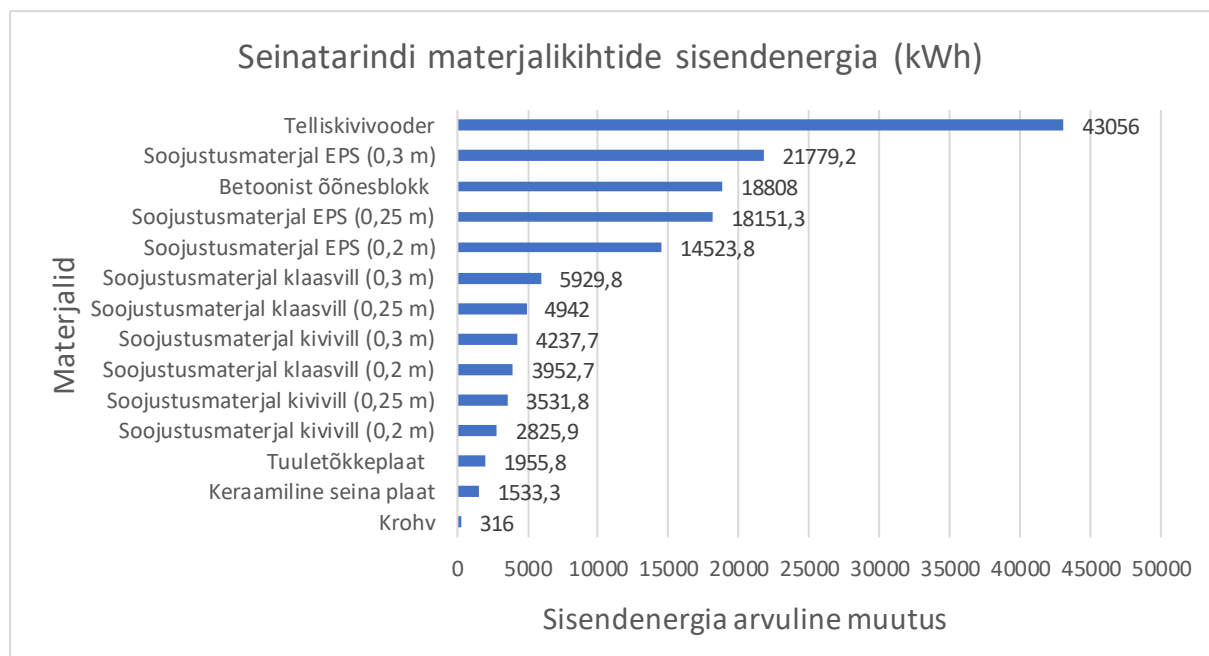
Seinatarindi suurima sisendenergiaga soojustusmaterjal, milleks on EPS kihipaksusega 0,3 meetrit ning madalaimaga sisendenergiaga soojustusmaterjal, milleks on kivivill kihipaksusega 0,2 meetrit, erinevad teineteisest 18953,3 kWh. See tähendab, et kivivilla sisendenergia on vaid 13% võrreldes EPS materjaliga. Seega, EPS materjali sisendenergia on 7,7 korda suurem kui kivivillal. Hoonetarindis võib kasutada 0,3 meetrise paksusega klaasvilla kui ka kivivilla kihti,

kuid EPS materjali kõige väiksema paksusega kiht (0,2 meetrit) on sisendenergia osakaalult ikkagi üle 50% suurem.

Kivivillast seinasoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 705,9 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 1411,8 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 8).

Klaasvillast seinasoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 989,3 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 1977,1 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 9).

EPS seinasoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 3627,5 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 7255,4 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 10).



Joonis 3. Seinatarindi materjalikihtide sisendenergia (kWh)

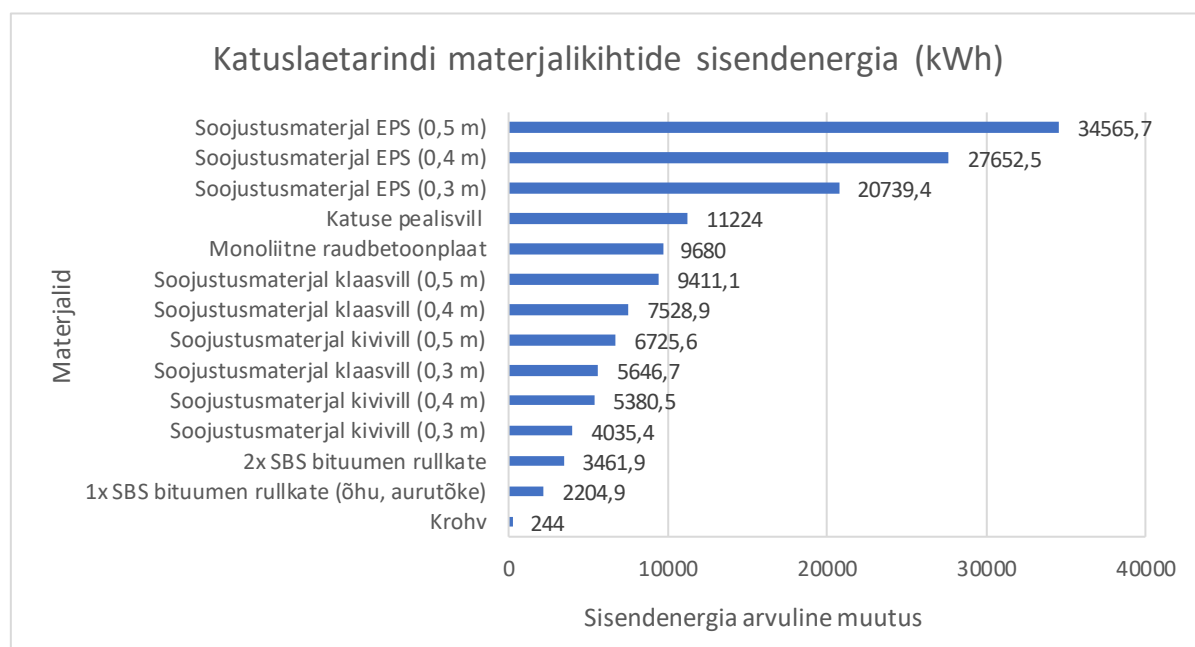
Katuslaetarindi kõikide materjalikihtide sisendenergia uurimisel selgus (joonis 4), et kõige suurem sisendenergia on 0,5 meetrise kihipaksusega soojustusmaterjalil EPS. Vastava materjalikihi sisendenergia on 34565,7 kWh. Kõige väiksema sisendenergiaga materjal on krohv, mille sisendenergia on 244 kWh. Soojustusmaterjalidest on kõige väiksema sisendenergiaga, nagu ka seinatarindis, kivivill soojustus. Väikseima kivivilla

soojustusmaterjali 0,3 meetri paksuse kihi sisendenergia on 4035,4 kWh. Väljatoodud suurima (EPS 0,5) ja väiksema sisendenergiaga (kivivill 0,3) soojustusmaterjalid erinevad üksteisest 30530,3 kWh. See tähendab, et kivivilla sisendenergia moodustab 11,67% EPS materjali omast. Samuti tähendab, et EPS materjali sisendenergia on 8,6 korda suurem kui kivivillal.

Kivivill katuslaesoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 1345,1 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 2689,8 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 11)

Klaasvill katuslaesoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 1882,2 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 3764,4 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 12)

EPS katuslaesoojustusega hoonetel suureneb tüüphoone 2 täiendav sisendenergia 6913,1 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega. Tüüphoone 3 täiendav sisendenergia suureneb 13826,3 kWh võrra, võrreldes tüüphoone 1 sisendenergia tarbimisega (Lisa 6, tabel 13)



Joonis 4. Katuslaetarindi materjalikihtide sisendenergia (kWh)

Materjalide sisendenergia suureneb nii seina- kui ka katuslaetarindis, kui kasutada paksemat materjali kihti. Erinevused tulevad esile ka materjalitüübis. Kõige suurema sisendenergiaga on

EPS materjal ning kõige väiksemaga kivivill, mistõttu tuleks eelistada materjalide sisendenergiat arvestades hoone ehitamisel kivivill soojustusmaterjali. Sein- ja katuslaetarind moodustavad kokku summaarse sisendenergia, mis kõige energiatõhusama, tüüphoone 1 kivivillsoojustusega hoone puhul, on 99345,2 kWh. Kõige suurema summaarse sisendenergiaga 148828,8 kWh on, aga tüüphoone 3 EPS soojustusega hoone (Lisa 7).

3.3. Sisendenergia ja operatiivse energia tulemused erineva soojustusmaterjali korral

Kõikide tüüphoonete ning soojustusmaterjalide korral suureneb materjali sisendenergia, kui kasutada paksemat soojustusmaterjali kihti. Vastupidiselt sisendenergiale, aga operatiivne energia väheneb, kui kasutada paksemat soojustusmaterjali kihti.

Seinatarindi ja katuslaetarindi sisendenergia summaarne osakaal (mõlema tarindi sisendenergia kogusumma) kogu hoone summaarsest energiatarbimisest (kogu sisendenergia + operatiivne energia 50 aasta jooksul) on toodud tabelis 1. Tabel 1 põhjal suureneb sisendenergia osakaal hoone summaarsest koguenergiast, soojustusmaterjali kihi paksenemisega tarindis, kõigi kolme uuritud soojustusmaterjali korral. Kivivillsoojustuse puhul, tüüphoones 1, moodustab sisendenergia kogu hoone summaarsest energiatarbimisest 14,6%, mis on vaadeldud juhtudest kõige väiksem. Kõige suurem sisendenergia osakaal on EPS soojustusmaterjalil tüüphoones 3, mis moodustab 21,79% kogu hoone summaarsest energiatarbimisest.

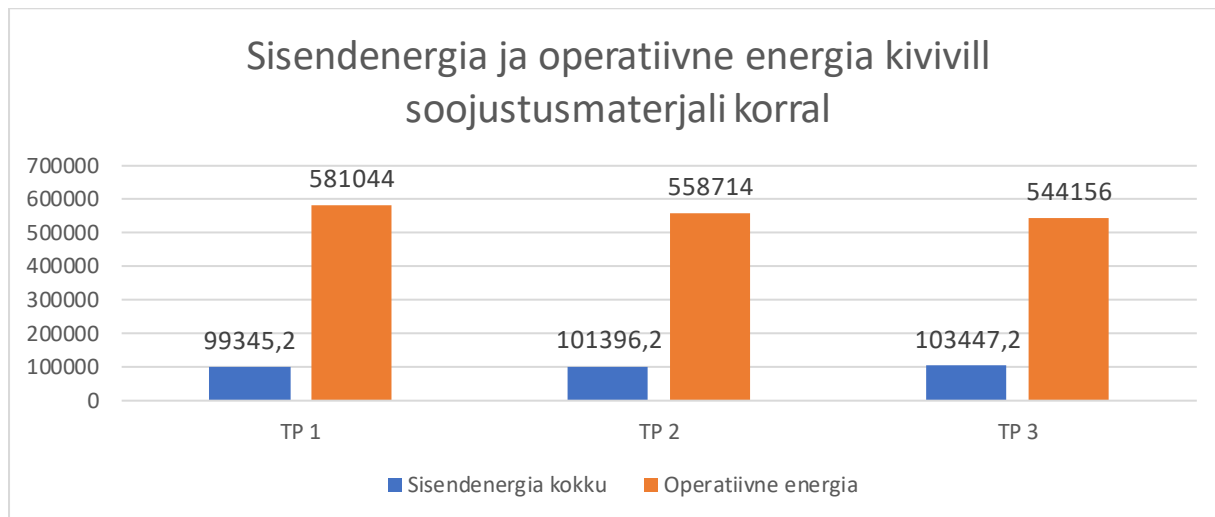
Sisendenergia osakaalu muutus kogu hoone summaarsest energiast, kui tõsta soojustuskihi paksust tüüphoone 1 tasemelt tüüphoone 3 tasemele erinevate materjalide lõikes, on kõige väiksem kivivillal, mis on 1,37%, klaasvillal on see 1,63% ning EPS soojustusmaterjalil 3,43% (tabel 1). Seega, suurendades soojustusmaterjali paksust, suureneb vaadeldud materjalide põhjal kõige vähem kivivilla sisendenergia osakaal kogu hoone summaarsest energiast, mis teeb kivivilla sisendenergiat arvestades kõige energiatõhusamaks soojustusmaterjali valikuks.

Tabel 1. Seinatarindi ja katuslaetarindi sisendenergia summaarne osakaal kogu summaarsest energiatarbimisest

	TP1	TP2	TP3
Kivivill	14,60%	15,36%	15,97%
Klaasvill	14,83%	15,72%	16,46%
EPS	18,36%	20,16%	21,79%

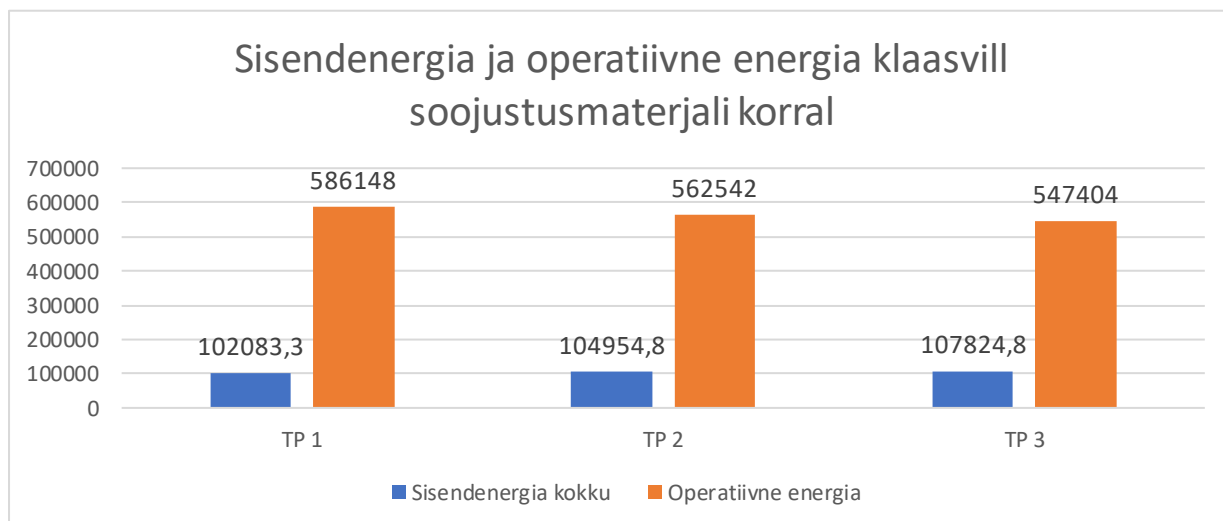
Erinevate tüüphoonete soojustusmaterjali kokkuhoitud operatiivne energia ja täiendavalt lisatud sisendenergia on ülevaatlikult toodud lisas 8. Kivivill soojustusmaterjali korral (joonis

5), kui kasutada tüüphoone 2 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 2051 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 22330 kWh. Kasutades tüüphoone 3 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 4102 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 36888 kWh.



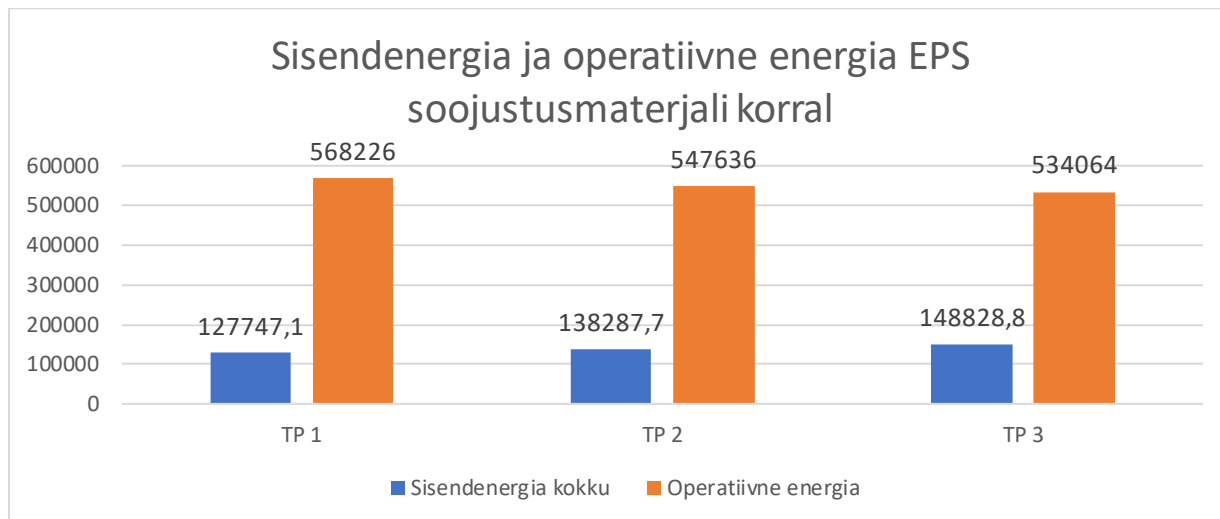
Joonis 5. Sisendenergia ja operatiivne energia kivivill soojustusmaterjali korral

Klaasvill soojustusmaterjali korral (joonis 6), kui kasutada tüüphoone 2 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 2871,5 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 23606 kWh. Kasutades tüüphoone 3 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 5741,5 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 38744 kWh.



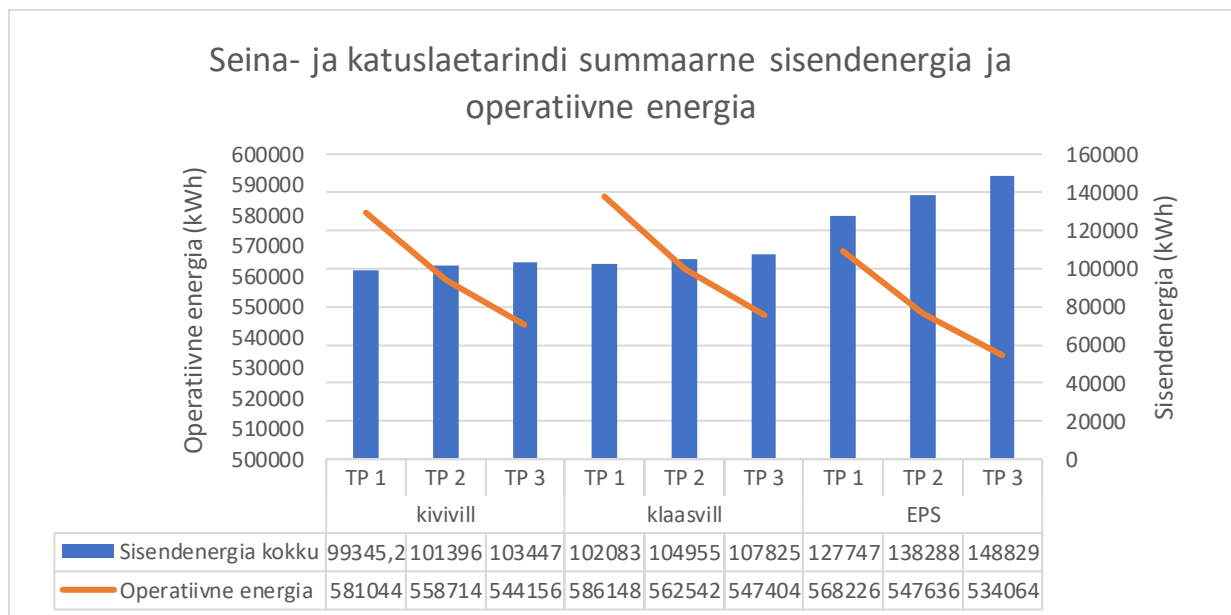
Joonis 6. Sisendenergia ja operatiivne energia klaasvill soojustusmaterjali korral

EPS soojustusmaterjali korral (joonis 7), kui kasutada tüüphoone 2 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 10540,6 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 20590 kWh. Kasutades tüüphoone 3 soojustusmaterjali paksusi võrreldes tüüphoone 1 paksustega, suureneb materjali täiendav sisendenergia 21081,7 kWh. Samal ajal, operatiivset energiat hoitakse kokku 34162 kWh.



Joonis 7. Sisendenergia ja operatiivne energia EPS soojustusmaterjali korral

Seina- ning katuslae summaarne kokkuhoitud operatiivne energia ja täiendavalt lisatud sisendenergia on toodud kõikide tüüphoonete ning materjalide korral kokkuvõtvalt joonisel 8.



Joonis 8. Seina- ja katuslaetarindi summaarne sisendenergia ja operatiivne energia

Kuigi EPS soojustusmaterjali kasutades on võimalik saavutada hoonele parim operatiivse energia energiatõhususarv, siis vaadeldud materjalidest on EPS materjali summaarne täiendav

sisendenergia kõige suurem. Kokkuhoitav operatiivne energia soojustusmaterjali paksuse lisamisel on EPS materjalil aga kõige väiksem.

Muutes kivivill soojustusmaterjali kihti hoones paksemaks, siis summaarne täiendav sisendenergia on materjalidest kõige väiksem. Samas, kokkuhoitav operatiivne energia on väiksem, kui klaasvill soojustusega hoones, kuid suurem kui EPS soojustusega hoones.

Muutes klaasvill soojustusmaterjali kihti hoones paksemaks, siis summaarne täiendav sisendenergia on suurem kui kivivillal, kuid väiksem, kui EPS materjalil. Kokkuhoitav operatiivne energia on vaadeldud materjalidest, aga kõige suurem.

Kogu sisend- ja operatiivse energia, mis hõlmab seina- ja katuslaetarindi summaarset sisendenergiat ja summaarset operatiivset energiat, võrdlus erinevate soojustusmaterjalide korral hoonete 50-aastaselt kasutusperioodil, on toodud tabelis 2. Võrreldakse tüüphoonet 2 ja tüüphoonet 3 tüüphoonega 1.

Tabel. 2 Kogu hoonete energiatarve (sisendenergia soojustusmaterjalidest + operatiivne energia 50-aastaselt perioodil)

	TP 1	TP 2	Energia kokkuhoid TP 2 võrreldes TP 1, kWh	Energia kokkuhoid, %	TP 3	Energia kokkuhoid TP 3 võrreldes TP 1, kWh	Energia kokkuhoid, %
Kogu energia-tarve kivivill, kWh	680 389,2	660 110,2	20 279	2,98	647 603,2	32 786	4,82
Kogu energia-tarve klaasvill, kWh	688 231,3	667 496,8	20 734,5	3,01	655 228,8	33 002,5	4,80
Kogu energia-tarve EPS, kWh	695 973,1	685 923,7	10 049,4	1,44	682 892,8	13 080,3	1,88

Tabel. 2 Kogu hoonete energiatarve (sisendenergia soojustusmaterjalidest + operatiivne energia 50-aastaselt perioodil) järg

	TP 1	TP 2	Energia kokkuhoid TP 2 võrreldes TP 1, kWh	Energia kokku- hoid, %	TP 3	Energia kokkuhoid TP 3 võrreldes TP 1, kWh	Energia kokku- hoid, %
Vahe energia- tarbes kivivill ja klaasvill, kWh	7 842,10	7 386,60	-	-	7 625,60	-	-
Vahe energia- tarbes kivivill ja EPS, kWh	15 583,90	25 813,50	-	-	35 289,60	-	-
Vahe energia- tarbes klaasvill ja EPS, kWh	7741,8	18426,9	-	-	27664	-	-
Vahe energia- tarbes kivivill ja klaasvill, %	1,15	1,12	-	-	1,18	-	-
Vahe energia- tarbes kivivill ja EPS, %	2,29	3,91	-	-	5,45	-	-
Vahe energia- tarbes klaasvill ja EPS, %	1,12	2,76	-	-	4,22	-	-

Tabelist 2 selgub, et juhul, kui suurendame kivivilla soojustusmaterjali kihi paksust seinas 0,2 meetri pealt 0,25 meetri peale ja katuslaes 0,3 meetri pealt 0,4 meetri peale, siis kasvab materjali sisendenergia. Samas, kui kihi paksust on suurendatud, siis hoone operatiivse energia tarbimise kulu väheneb esialgsest energiast (50 aasta jooksul). Summaarselt hoitakse kogu hoone 50-

aastase olulusringi jooksul kivivilla soojusmaterjalina kasutades, võrreldes tüüphoonega 1, tüüphoones 2 kokku 2,98% energiat ning tüüphoones 3 hoitakse kokku 4,82% energiat. Soojustusmaterjali EPS korral on aga summaarne energia kokkuhoid hoone kogu 50-aastase olulusringi jooksul, võrreldes tüüphoonega 1, tüüphoones 2 ainult 1,44% ja tüüphoones 3 on energia kokkuhoid 1,88%.

Lisaks sellele, summaarne energiakulu on kogu hoone 50-aastase olulusringi korral EPS soojustusmaterjali kasutades suurem, kui kivivilla või klaasvilla kasutades. Tüüphoon 3 korral on summaarne hoone energiakulu EPS soojustusmaterjaliks kasutades juba 5,45% suurem, kui kivivilla kasutamisel ja 4,22% suurem, kui klaasvilla kasutamisel.

Materjalide energiasisaldusega tuleb energiatõhusate hoonete kasutuselevõtul üha rohkem arvestada, sest madala energiatarbimisega ja järjest soojapidavamates hoonetes on sisendenergia märkimisväärne osakaal kogu elutsüklis tarbitavast energiast (Miljan, 2012). Samuti toetab antud uurimustöö sama väidet, sest mida paksemaks muudeti soojustusmaterjali kihti, seda suuremaks kasvas soojustusmaterjali summaarne sisendenergia osakaal kogu hoone elutsüklis tarbitavast energiast. Samuti esinesid erinevused erinevate materjalitüüpidel, millest hoonetele kõige suurema energiatõhususe tagas EPS soojustusmaterjali kasutamine. Seega, kui me lähtume Eestis kehtivatest „Hoonete energiatõhususe miinimumnõuete“ regulatsioonist (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, 2015) ja arvestame ainult hoone operatiivse (kasutusaegse) energiatõhususega, siis peaksime me hoonet projekteerides valima soojustusmaterjaliks EPS.

Kogu hoone olulusringi arvestades, teeme me aga sellisel juhul vea, kuna summaarne hoone 50-aastase olulusringi energiakulu on tegelikult EPS soojustusmaterjali kasutades kõige suurem. Optimaalseim lahendus oleks soojustusmaterjalina kasutada kivivilla, kuna sel juhul on kogu hoone 50-aastase olulusringi energiakulu kõige madalam. Ka klaasvilla puhul jääb summaarne energiakulu soojustusmaterjali kihi paksust suurendades, võrreldes EPS kasutamisega, oluliselt madalamaks.

Praegusel hetkel on maailmas suur rõhk konventsionaalsete ning tööstuslike soojustusmaterjalide kasutamisel. Need materjalid on juba laialdaselt levinud ning seetõttu madalama hinnaga ja seetõttu on tekkinud teatud skeptilisus keskkonnasõbralikumate lahenduste kasutuselevõtu vastu (Bribián *et al.*, 2011). Antud uurimustöös kasutati samuti peamisi Euroopa ehitusmaterjaliturgudel levinud ja kasutatavaid soojustusmaterjale (Azari & Abbasabadi, 2018). Uurimistööga selgus, et konventsionaalsed soojustusmaterjalid ja nende

sisendenergia moodustavad olulise osa hoone olelusringi koguenergiast. Samuti EPS soojustusmaterjali uurimise tulemusena selgus, et konventsionaalne ja laialt kasutatav soojustusmaterjal pole alati kõige energiatõhusam ja keskkonnasäästlikum lahendus materjali sisendenergia poolest, kuigi on operatiivse energia vähendajana tõhus.

Avalik-õiguslike asutuste täiendavad regulatsioonid aitaksid, et materjalitootjad kasutaksid rohkem toote deklaratsioone, kus oleks standariseeritud teave toote reaalse elutsükli mõju kohta. See looks suurema konkurentsi materjalitootjate vahel, et tuua turule ökoloogiliselt tõhusamaid tooteid, millel on väiksem keskkonnamõju ning materjali lõppenergia tarbimine (Bribián *et al.*, 2011). Samuti võimaldaks tihedam koostöö materjalitööstuste ja tootjate vahel luua terviklikumad madala sisendenergiaga materjalide andmebaasid ning pakkuda usaldusväärsemat informatsiooni operatiivse ja sisendenergia toimimise vahel (Azari & Abbasabadi, 2018).

Samuti oleks käesoleva töö autori hinnangul Eesti hoonete energiatõhususe regulatsiooni vaja tulevikus täiendada, et hoonete projekteerimisel arvestataks ka hoone ehitamiseks kuluva sisendenergia väärtuseid ja saavutataks seeläbi parem hoone energiatõhusus kogu hoone olelusringi kestel.

Kokkuvõte

Euroopas ning Eestis on võetud kindel tulevikusuund, et uued ehitatavad hooned vastaksid energiatõhususarvult liginullenergiahoonetele kehtestatud piirväärtusele. Vastava energiatõhususe saavutamist toetab, kui kasutatakse hoonete piirdetarindites soojustusmaterjale. Erinevate soojustusmaterjalide ning nende materjalidekihtide paksuse tõstmisega on võimalik vähendada hoonete energiavajadust energiatarbe suurendamise arvelt.

Hoonete elutsükli energiaanalüüsi tuleks hõlmata nii operatiivne energia, millele on varasemalt uuringutes suuremat rõhku pandud. Samuti peab elutsüklianalüüsis analüüsima materjalide sisendenergiat, millele on hakatud viimastel aastatel rohkem rõhku panema, kuna energiatõhusate hoonete tarindid on paksemad ja kasutatakse soovitud energiatõhususe saavutamiseks rohkem soojustusmaterjale.

Antud uurimustöös uuriti Euroopa turul mõnesid peamiseid kasutusel olevaid soojustusmaterjale nagu kivivill, klaasvill ning EPS ehk vahtpolüstüreen. Uuringu läbiviimiseks projekteeris autor ühekorruselise hoone mudeli Revit 2018.3 programmis. Seejärel kasutati BV² programmi, mis võimaldas analüüsida hoone energiatarvet, kui muuta erinevaid soojustusmaterjale ja nende kihipaksuseid. Materjali sisendenergia analüüsimiseks kasutati hällist-värvani meetodit.

Analüüsi käigus selgus, et kõik uuritud erinevate soojustusmaterjalidega ja paksustega hooned olid madalenergiahooned ning nende energiatõhususarv varieerus. Kõige energiatõhusam hoone, kõige madalama energiatõhususarvuga, oli tüüphoone 3 EPS soojustusmaterjaliga, mille energiatõhususarv oli 92,08 kWh/m²a. Kõige suurema energiatõhususarvuga oli aga tüüphoone 1 kivivill soojustusmaterjaliga hoone, mille energiatõhususarv oli 101,06 kWh/m²a.

Analüüsi käigus selgus, et hoonete sisendenergia summaarne osakaal moodustas kuni 21,79% kogu hoone summaarsest energiatarbimisest (hoone 50-aastase kasutusperioodi jooksul). Soojustusmaterjali muutes ning materjalile paksust lisades suurenes materjali sisendenergia kuni 8,6 korda.

Soojustusmaterjal EPS oli uuritud soojustusmaterjalidest kõige väikseima operatiivse energiaga ning EPS soojustusmaterjaliga tüüphooned saavutasid kõige parema hoone kasutusaegse energiatõhuse. EPS soojustusmaterjalil polnud operatiivselt energiatarbimiselt saavutatud energiatõhusus aga tasakaalus sisendenergiaga, sest sisendenergiale kulus soojustusmaterjali suurendamisel rohkem energiat, kui operatiivselt energialt saavutatud kokkuhoid. Samuti

osutus tänu EPSi suurimale sisendenergiale kogu hoone 50-aastase olelusringi võrdluses soojustusmaterjali EPS kasutamine kõige vähem energiatõhusaks.

Kivivilla ja klaasvilla soojustusmaterjali operatiivse energia energia tarbimine oli suurem, kui seda EPS soojustusmaterjalil. Samas on klaasvilla ja kivivilla sisendenergiad väiksemad ning saadud tulemused olid keskkonnahoiu aspektist jätkusuutlikumad, sest saavutatakse parem energiatõhusus kogu hoone elutsükli arvestades.

Hoonete energiamahukuse määramisel ja energiatõhusate hoonete kasutuselevõtul tuleks üha rohkem arvestada, et madala energiatarbimisega hoonetes on sisendenergial märkimisväärne osakaal kogu elutsükli tarbitavast energiast. Samuti, hoones kasutavate materjalide ning optimaalse materjali kihi valikul ja planeerimisel tuleb silmas pidada sisendenergia erinevusi erinevatel materjalitüüpidel. Erinevad materjalid võivad vähendada märgatavalt operatiivselt energia kokkuhoidu, kuid samas võivad suurendada sisendenergiat. Töö tulemusena selgus, et kuigi hoone operatiivse energiatõhususe osas on kõige paremaks soojustusmaterjaliks EPS, siis kõige optimaalsem on kasutada soojustusmaterjalina kivivilla, sest siis on kogu hoone 50-aastase olelusringi summaarne energiakulu kõige väiksem.

Seega, oleks soovitatav Eesti hoonete energiatõhususe regulatsiooni täiendada selliselt, et hoonete projekteerimisel arvestataks ka hoone ehitamiseks kuluva materjali sisendenergia väärtuseid.

Summary

Energy consumption of buildings in respect of the changes in the thermal insulation of the buildings' exterior borders.

There is a definite future direction in Europe and Estonia for the newly constructed buildings to meet the energy efficiency threshold of the near-zero energy buildings. Reaching the corresponding energy efficiency is supported by the use of thermal insulation materials in the exterior borders of buildings. By using different insulation materials and increasing the thickness of these materials, it is possible to reduce the energy demand of buildings instead of increasing energy consumption.

The life-cycle energy analysis of buildings should cover operational energy, which has been given greater emphasis in studies in the past. Also, in the life cycle analysis, the embodied energy of materials has to be analyzed, which has received more attention in recent years, as energy-efficient building structures are thicker and more heat insulation materials are used to achieve the desired energy efficiency.

In this research study, some of the main in-use insulation materials on the European market, such as rock wool, glass wool and expanded polystyrene (EPS), were studied. For the research, the author designed a one-story building model in the Revit 2018.3 program. The BV² program was then used to analyze the energy consumption of the building by varying the different thermal materials and their layers of thickness. The cradle-to-gate method was used to analyze the embodied energy of the material.

During the analysis it turned out that all the buildings with different insulation materials and thicknesses that were studied, were low-energy buildings and their energy efficiencies varied. The most energy-efficient building with the lowest energy consumption was building type 1 (TP 1) using EPS as insulation material and having energy efficiency of 92.08 kWh/m²a. However, the building with the highest energy was building type (TP 3) using stone wool as insulation material stone wool and having an energy efficiency of 101.06 kWh/m²a.

The analysis revealed that the total share of the buildings' embodied energy accounted up to 21,79% of the buildings' total energy consumption during their 50-year period of use. Also, by changing the insulation material and adding material thickness, the material embodied energy of the studied buildings increased up to 8,6 times.

Among all the studied insulation materials, EPS had the lowest operational energy and the buildings insulated with it reached the most efficient building energy during their usage life span. The operational energy of the EPS insulation material was not in balance with the embodied energy, because the thicker the insulation material, the more embodied energy was used compared with the achieved energy savings from the operational energy. Thanks to the EPS's largest embodied energy, when comparing the 50-year life cycle of the whole building, the EPS insulation material turned out to be the least energy-efficient.

The operational energy consumption of stone wool and glass wool as insulation materials was higher than that of the EPS insulation material. At the same time, glass wool and stone wool have lower embodied energy, which results in more environmental sustainability, since better energy efficiency is achieved throughout the building life cycle.

With the determination of the energy volume of buildings and with the increasing use of energy efficient buildings, it should be taken into account that low-energy buildings have a significant share of embodied energy consumption among all the buildings' life cycle energy consumption. Also, when selecting the materials, which will be used in the building and when planning the optimal material layer, the differences in embodied energy between different types of materials have to be considered. Different materials can significantly reduce savings from operational energy, but at the same time they can also increase the amount of embodied energy.

As a result of the work, it turned out that although the best possible insulation material for operational energy is EPS, then the most optimal solution is to use stone wool as an insulation material, because then the total energy consumption of the whole 50-year life cycle of building is the lowest.

Therefore, it would be desirable to supplement the regulation of energy efficiency of Estonian buildings in such a way that the embodied energy values of the materials used for the buildings would be considered when designing them.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Alar Noorveed, kelle heade nõuannete toel töö valmis. Soovin tänada ka oma perekonda ja sõpru suure toetuse eest töö tegemisel ajal.

Kasutatud kirjandus

Arjakas, P., & Kurnitski, J. (2013). Hoonestuse (elamumajanduse) valdkonna arengukava 2030+ lähteolukorra analüüs. Tallinn. Kasutatud 20.04.2018.

[https://energiatalgud.ee/img_auth.php/6/6a/Arjakas,_M.%3B_Kurnitski,_J._Hoonestuse_\(elamumajanduse\)_valdkonna_arengukava_2030%2B_lähteolukorra_analüüs.pdf](https://energiatalgud.ee/img_auth.php/6/6a/Arjakas,_M.%3B_Kurnitski,_J._Hoonestuse_(elamumajanduse)_valdkonna_arengukava_2030%2B_lähteolukorra_analüüs.pdf)

As Columbia-Kivi. (2018). As Columbia-Kivi õõnesblokk. Tartu maakond. Kasutatud 02.05.2018. <http://www.columbia-kivi.ee/tooted/oonesplokid/140-oonesplok>

Azari, R., & Abbasabadi, N. (2018). Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Energy and Buildings Volume 168*, lk 225-235.

Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., Betsy, V., Kalaitzoglou, I., Pagliano, L., Cellura, M., Almeida, M., Ferreira, M., Baracu, T., Badescu, V., Crutescu, R., Hidalgo-Betanzos, J. M. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings Volume 155*, lk 439-458.

Autodesk Revit. (2018). Kasutatud 10.01.2018. <https://www.autodesk.com/education/free-software/revit>

Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.-D. (2017). Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. *Energy and Buildings Volume 150*, lk 527-545.

Brēmere, I., Indriksone, D., Aleksejeva, I. (2013). Energy efficient and ecological housing in Finland, Estonia and Latvia: current experiences and future perspectives. Riia. Kasutatud 26.04.2018. <http://www.ecohousing-project.eu/wp-content/uploads/2014/02/Energy-efficient-and-ecological-housing-in-FI-EE-and-LV1.pdf>

Bribián, I. Z., Capilla, A. V., Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment Volume 46*, lk 1133-1140.

Buildings Performance Institute Europe. (2011). Europe's buildings under the microscope. Brüssel. Kasutatud 03.05.2018. http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf

Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment Volume 105*, lk 267-282.

Circular Ecology. (2018). The Inventory of Carbon and Energy (ICE) database. Kasutatud 28.04.2018. <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.WwLeePZuJPY>

CIT Energy Management AB. (2007). Hoonete energiavajaduse arvutamise tarkvara BV². Göteborg. Kasutatud 14.04.2018. <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus>

Copiello, S. (2016). Economic implications of the energy issue: Evidence for a positive non-linear relation between embodied energy and construction cost. *Energy and Buildings Volume 123*, lk 59-70.

Csiba, K., Bajomi, A., Gosztonyi, Á. (2016). *Energy Poverty Handbook*. Brüssel. Kasutatud 01.05.2018. <http://meszerics.eu/pdf/energypovertyhandbook-online.pdf>

D'Agostino, D., Parker, D. (2018). A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. *Energy Volume 149*, lk 814-829.

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 79*, lk 390-413.

Dodoo, A., Tettey, U. Y., Gustavsson, L. (2014). Effects of different insulation materials on primary energy and CO₂ emission of a multi-storey residential building. *Energy and Buildings Volume 82*, lk 369-377.

EVS 908-1:2016. (2016). Hoone piirdetarindi soojuslääbivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire.

EVS 932: 2017. (2017). Ehitusprojekt (Construction design documents).

Euroopa Komisjon. (2016). Impact assessment of a Commission proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. Brüssel. Kasutatud 27.04.2018. <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2016/EN/SWD-2016-414-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL. (2010). Kasutatud 28.04.2018. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>

Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2012/27/EL. (2012). Kasutatud 29.04.2018. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

Fokaides, P. A., Polycarpou, K., Kalogirou, S. (2017). The impact of the implementation of the European Energy Performance of Buildings Directive on the European building stock: The case of the Cyprus Land Development Corporation. *Energy Policy Volume 111*, lk 1-8.

Giordano, R., Serra, V., Demaria, E., Duzel, A. (2017). Embodied energy versus operational energy in a nearly zero energy building case study. *Energy Procedia Volume 111*, lk 367-376.

Grant, A., Ries, R. (2013). Impact of building service life models on life cycle assessment. *Building Research & Information Volume 41*, lk 168-186.

Gustavsson, L., Joelsson, A. (2010). Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings Volume 42*, lk 210–220.

Hestnes, A. G., Sartori, I. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings Volume 39*, lk 249-257.

Institut Bauen und Umwelt. (2018). Institut Bauen und Umwelt andmebaas. Kasutatud 06.05.2018. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/9147>

Just, E., Just, A. (2016). Puitkonstruktsioonid arhitekti õppes. Tallinn. Kasutatud 05.05.2018. https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppe_materjalid/puit_arhitektid/Arh_Puit_2016.pdf

Kalamees, T., Arumägi, E. (2016). Design of the first net-zero energy buildings in Estonia. *Science and Technology for the Built Environment 22*, lk 1039–1049.

Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16*, lk 415-425.

Kovacic, I., Reisinger, J., Honic, M. (2018). Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 82*, lk 1774-1786.

Kurnitski, J., Kalamees, T., Hamburg, A., Kuusk, K., Kull, T. M., Simson, R., Fadejev, J., Arumägi, E., Kiil, M., Tark, T. (2016). *Hoonete arvutuslike energiamärgiste vastavus tegelikule tarbimisele*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli ehitiste projekteerimise instituut. Kasutatud 26.04.2018. https://www.mkm.ee/sites/default/files/hoonete_arvutuslike_energiamargiste_vastavus_tegelikule_tarbimisele.pdf

Energiamajanduse arengukava aastani 2030. (2016). Tallinn. Kasutatud 20.04.2018. https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030_koos_elamumajanduse_lisaga.pdf

Masso, T. (2012). *Ehitusfüüsika ABC*. Tallinn: Ehitame kirjastus.

Miljan, J. (2012). *Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine*. Tartu: Salibar OÜ.

Monteiro, H., Fernández, J. E., Freirea, F. (2016). Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant's habits, building systems and embodied energy. *Sustainable Cities and Society Volume 26*, lk 507-518.

QP Arhitektid OÜ. (2018). Liginullenergia eluhooned Suur eramu arhitektuur. Kasutatud 15.02.2018. <http://www.kredex.ee/energiatohususest/liginullenergiahooned/hoonete-projektid/>

Rauf, A., Crawford, R. H. (2015). Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings. *Energy Volume 79*, lk 140-148.

Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika. (2015). Kasutatud 13.05.2018. <https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021>

Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (2015). Kasutatud 14.05.2018. <https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015>

Sadineni, S. B., Madala, S., Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 15*, lk 3617-3631.

Samuel, E. I., Joseph-Akwara, E., Richard, A. (2017). Assessment of energy utilization and leakages in buildings with building information model energy. *Frontiers of Architectural Research Volume 6*, 29-41.

Santamouris, M. (2016). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy Volume 128*, lk 61-94.

Sartori, I., Bergsdal, H., Müller, D. B., Brattebø, H. (2008). Towards modelling of construction, renovation and demolition activities: Norway's dwelling stock, 1900–2100. *Building Research & Information Volume 36*, lk 412-425.

Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 62*, lk 988–1011.

Statistikaamet. (2018). Ehitusmaht mullu suurenes, pressiteade nr 18. Eesti. Kasutatud 22.04.2018. <https://www.stat.ee/pressiteade-2018-018>

Tark, T., Kalamees, T. (2012). Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine. Tallinn. Kasutatud 16.02.2018. http://www.kredex.ee/public/Uuringud/Madalenergia-_ja_liginullenergiahoone_kavandamine_Vaikeelamu.pdf

Tettey, U. Y., Dodoo, A., Gustavsson, L. (2014). Primary Energy Implications of different Wall Insulation Materials for Buildings in a Cold Climate. *Energy Procedia Volume 61*, lk 1204-1207.

The European Fuel Poverty and Energy Efficiency study. (2009). Tackling Fuel Poverty in Europe: Recommendations and Guide for Policy Makers. Brüssel. Kasutatud 06.05.2018. http://www.finlombarda.it/c/document_library/get_file?p_l_id=1313844&folderId=1327936&name=DLFE-6278.pdf%20

The Norwegian EPD Foundation. (2018a). Rockwool kivivill EPD. Kasutatud 15.05.2018. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Isolasjon/NEPD-00131E_rev1_ROCKWOOL-isolering%281%29.pdf

The Norwegian EPD Foundation. (2018b). Bituumen rullkate (kahekihiline) EPD. Kasutatud 15.05.2018. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Takbelegg_membraner/NEPD00270E_Multi-layer-mechanically-fastened-modified-bitumen-roof-waterproofing-system.pdf

The Norwegian EPD Foundation. (2018c). Katuslae pealisvill EPD. Kasutatud 15.05.2018. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Isolasjon/NEPD00266E_Paroc-Insulation--product-group-with-density--120-kg-m--_1.pdf

The Norwegian EPD Foundation. (2018d). Bituumen rullkate (ühekihiline) EPD. Kasutatud 15.05.2018. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Takbelegg_membraner/NEPD268E_Single-layer-mechanically-fastend-modified-bitumen-roof-waterproofing-system.pdf

Thormark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment Volume 37*, lk 429-435.

Timbeco Woodhouse OÜ. (2018). Liginullenergia eluhooned väike eramu arhitektuur. Kasutatud 15.02.2018. <http://www.kredex.ee/energiatohususest/liginullenergiahooned/hoonete-projektid/>

Tingley, D. D., Hathway, A., Davison, B. (2015). An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Building and Environment Volume 85*, lk 182-189.

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut. (2017). Liginullenergia eluhooned Väikemajad. Kasutatud 16.02.2018. <http://www.kredex.ee/energiatohususest/liginullenergiahooned/juhendmaterjal-2/>

LISAD

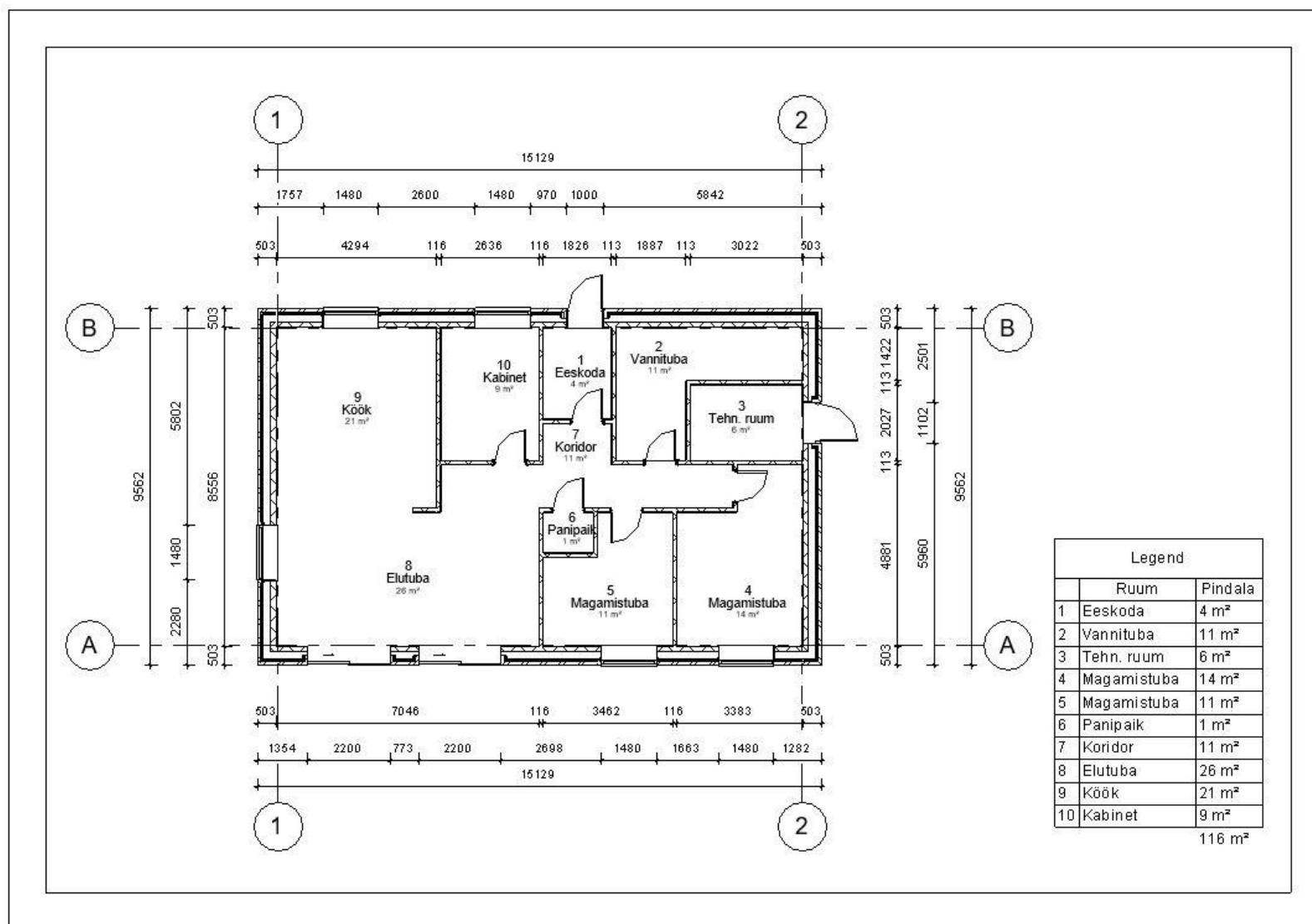
Lisa 1. Tüüphoone 1 joonised ja asendiplaan



Joonis 1. Tüüphoone 1 vaade põhjaküljelt



Joonis 2. Tüüphoone 1 vaade lõunaküljelt



Joonis 3. Tüüphoone 1 asendiplaan mõõtkavas 1:100

Lisa 2. Tüüphoone 1 andmed

Hoone konstruktsioon	Kihi paksus (m)
1. Välissein	
Tellisvooder	0,085
Tuulutusvahe	0,040
Tuuletõkkeplaat	0,030
Soojustusvill kivivill (klaasvill, EPS)	0,200
Betoonist õõnesblokk	0,140
Krohv	0,008
2. Välissein (niiskes ruumis)	
Tellisvooder	0,085
Tuulutusvahe	0,040
Tuuletõkkeplaat klaasvill	0,030
Soojustusvill kivivill (klaasvill, EPS)	0,200
Betoon õõnesblokk	0,140
Plaadid	0,005
3. Sisesein	
Krohv	0,008
Fibo plokk	0,100
Krohv	0,008
4. Sisesein (niiskes ruumis)	
Krohv	0,008
Fibo plokk	0,100
Plaadid	0,005
5. Põrand	
Põrandaviimistlus (puit)	0,15
Lihvitud raudbetoonplaat	0,100
EPS polüstüreen	0,300
Geotekstiil (hüdroisolatsioon)	0,008
Pinnas	0,2

Lisa 2. Tüüppoone 1 andmed järg

Hoone konstruktsioon	Kihi paksus (m)
6. Põrand (niiskes ruumis)	
Plaadid	0,005
Lihvitud raudbetoonplaat	0,100
EPS polüstüreen	0,300
Geotekstiil (hüdroisolatsioon)	0,008
Pinnas	0,2
7. Katuslagi	
2x SBS bituumen rullkate	0,008
Katuse pealiskate	0,03
Kivivill (klaasvillaks ja EPSiks)	0,3
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16
Krohvi	0,005
8. Vundament	
Monoliitne raudbetoonplaat	0,07
EPS 120	0,200
Täisbetoneeritud õõnesblokk	0,140
Vundamendi taldmik (betoon)	0,200

Lisa 3. Piirdetarindite soojusläbivus (U-arv) tabelid

Tabel 1. Välisseina U- arv, kivivill soojustusmaterjali (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m) korral

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Sein	m	W/ (m * K)	m ² * K/ W	W/ (m ² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,13		(EVS 908-1:2016, 2016)
Tellisvooder	0,085	0,6	0,14		(CIT Energy Management AB, 2007)
Tuulutusvahe	0,040	0,025	1,6		(Masso, 2012)
Tuuletõkkeplaat	0,030	0,032	0,94		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Soojustusmaterjal kivivill	0,200	0,036	5,56		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
	0,250	0,036	6,94		
	0,300	0,036	8,33		
Betoonist õõnesblokk	0,140	1,19	0,18		(As Columbia-Kivi, 2018)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,1		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (kivivill 0,2m)	0,503		8,69	0,115 ~ 0,12	
Kogu paksus, R ja U (kivivill 0,25m)	0,553		10,07	0,099 ~ 0,10	
Kogu paksus, R ja U (kivivill 0,3m)	0,603		11,46	0,087 ~ 0,09	

Tabel 2. Välisseina U- arv, klaasvill soojustusmaterjali (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m) korral

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Sein	m	W/ (m * K)	m² * K/ W	W/ (m² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,13		(EVS 908-1:2016, 2016)
Tellisvooder	0,085	0,6	0,14		(CIT Energy Management AB, 2007)
Tuulutusvahe	0,040	0,025	1,6		(Masso, 2012)
Tuuletõkkeplaat	0,030	0,032	0,94		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Soojustusmaterjal klaasvill	0,200	0,038	5,26		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
	0,250	0,038	6,58		
	0,300	0,038	7,89		
Betoonist õõnesblokk	0,140	1,19	0,18		(As Columbia-Kivi, 2018)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,1		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (klaasvill 0,2m)	0,503		8,39	0,119 ~ 0,12	
Kogu paksus, R ja U (klaasvill 0,25m)	0,553		9,71	0,102 ~ 0,10	
Kogu paksus, R ja U (klaasvill 0,3m)	0,603		11,02	0,090 ~ 0,09	

Tabel 3. Välisseina U- arv, vahtpolüstüreen (EPS) soojustusmaterjali (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m) korral

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Sein	m	W/ (m * K)	m ² * K/ W	W/ (m ² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,13		(EVS 908-1:2016, 2016)
Tellisvooder	0,085	0,6	0,14		(CIT Energy Management AB, 2007)
Tuulutusvahe	0,040	0,025	1,6		(Masso, 2012)
Tuuletõkkeplaat	0,030	0,032	0,94		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Soojustusmaterjal EPS (60 Silver)	0,200	0,032	6,25		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
	0,250	0,032	7,81		
	0,300	0,032	9,38		
Betoonist õõnesblokk	0,140	1,19	0,18		(As Columbia-Kivi, 2018)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,1		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,2m)	0,503		9,38	0,107 ~ 0,11	
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,25m)	0,553		10,94	0,091 ~ 0,09	
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,3m)	0,603		12,51	0,079 ~ 0,08	

Tabel 4. Katuslae U- arv, kivivill soojustusmaterjali (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m) korral

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Katuslagi	m	W/ (m * K)	m ² * K/ W	W/ (m ² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,1		(EVS 908-1:2016, 2016)
2x SBS bituumen rullkate	0,008	0,250	0,032		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Katuse pealisvill	0,03	0,039	0,77		(TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017)
Soojustusmaterjal kivivill	0,300	0,036	8,33		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
	0,400	0,036	11,11		
	0,500	0,036	13,89		
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	0,250	0,016		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	2,30	0,07		(Masso, 2012)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,01		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (Kivivill 0,3m)	0,51		9,37	0,107 ~ 0,11	
Kogu paksus, R ja U (Kivivill 0,4m)	0,61		12,24	0,082 ~ 0,08	
Kogu paksus, R ja U (Kivivill 0,5m)	0,71		14,93	0,067 ~ 0,07	

Tabel 5. Katuslae U- arv, klaasvill soojustusmaterjali (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m) korral.

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Katuslagi	m	W/ (m * K)	m² * K/ W	W/ (m² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,1		(EVS 908-1:2016, 2016)
2x SBS bituumen rullkate	0,008	0,250	0,032		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Katuse pealisvill	0,03	0,039	0,77		(TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017)
Soojustusmaterjal klaasvill	0,300	0,038	7,89		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
	0,400	0,038	10,53		
	0,500	0,038	13,16		
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	0,250	0,016		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	2,30	0,07		(Masso, 2012)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,01		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (Klaasvill 0,3m)	0,51		8,93	0,112 ~ 0,11	
Kogu paksus, R ja U (Klaasvill 0,4m)	0,61		11,57	0,086 ~ 0,09	
Kogu paksus, R ja U (Klaasvill 0,5m)	0,71		14,20	0,070 ~ 0,07	

Tabel 6. Katuslae U- arv, EPS soojustusmaterjali (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m) korral

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Katuslagi	m	W/ (m * K)	m ² * K/ W	W/ (m ² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rsi)			0,1		(EVS 908-1:2016, 2016)
2x SBS bituumen rullkate	0,008	0,250	0,032		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Katuse pealisvill	0,03	0,039	0,77		(TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut, 2017)
Soojustusmaterjal EPS (100 Silver)	0,300	0,030	10		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
	0,400	0,030	13,33		
	0,500	0,030	16,67		
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	0,250	0,016		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	2,30	0,07		(Masso, 2012)
Lubiliiv krohv	0,008	0,800	0,01		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (Rse)			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,3m)	0,51		11,04	0,091 ~ 0,09	
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,4m)	0,61		14,37	0,069 ~ 0,07	
Kogu paksus, R ja U (EPS 0,5m)	0,71		17,71	0,056 ~ 0,06	

Tabel 7. Põranda U- arv

Tarind	d	λ	R	U	λ-allikas
Põrand	m	W/ (m * K)	m ² * K/ W	W/ (m ² * K)	
Piirdetarindi pinna soojustakistus (R _{si})			0,17		(EVS 908-1:2016, 2016)
Põrandaviimistlus (puit)		0,10,130	1,15		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Lihvitud raudbetoonplaat	0,100	2,30	0,04		(Masso, 2012)
Soojustusmaterjal EPS (120 Perimeeter)	0,300	0,035	8,57		(QP Arhitektid OÜ, 2018)
Geotekstiil (hüdroisolatsioon)	0,008	0,250	0,032		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Pinnas	0,2	2,000	0,1		(Timbeco Woodhouse OÜ, 2018)
Piirdetarindi pinna soojustakistus (R _{se})			0,04		(EVS 908-1:2016, 2016)
Kogu paksus, R ja U	0,758		10,10	0,099 ~ 0,10	

Lisa 4. Tüüphoonete energiatarbimine

Väikeelamu 116 m ²				Energiatarbimine	
Tüüphoon (TP)	Materjal	Seinakihi paksus	Katuslaekihi paksus	Energiatõhususarv	Operatiivne energiakulu (50. aastat)
		m	m	kWh/m ² a	kWh
TP 1	kivivill	0,2	0,3	100,18	581044
TP 1	klaasvill	0,2	0,3	101,06	586148
TP 1	EPS	0,2	0,3	97,97	568226
TP 2	kivivill	0,25	0,4	96,33	558714
TP 2	klaasvill	0,25	0,4	96,99	562542
TP 2	EPS	0,25	0,4	94,42	547636
TP 3	kivivill	0,3	0,5	93,82	544156
TP 3	klaasvill	0,3	0,5	94,38	547404
TP 3	EPS	0,3	0,5	92,08	534064

Lisa 5. Materjali sisendenergiad hällist väravani meetodil

Hoone konstruktsioon	Ühik	Sisendenergia väärtus MJ	Tihedus kg/m ³	Allikas
Soojustusmaterjalid				
Kivivill	kg	13,8	29	(The Norwegian EPD Foundation, 2018a)
Klaasvill	kg	28	20	(Circular Ecology, 2018; Institut Bauen und Umwelt, 2018)
Vahtpolüstüreen (EPS)	kg	85,7	24	(Miljan, 2012; Circular Ecology, 2018)
Ülejäänud materjalid				
Telliskivi	kg	6,9	2080	(Circular Ecology, 2018)
Tuuletõkkeplaat	kg	16,8	110	(Circular Ecology, 2018)
Betoonist õõnesblokk	kg	3,46	1100	(Miljan, 2012; As Columbia-Kivi, 2018)
Krohvi	kg	1,8	800	(Circular Ecology, 2018)
SBS bituumen rullkate (kahekordne)	m ²	103		(The Norwegian EPD Foundation, 2018b)
Katuse pealiskate	kg	77,3	144	(The Norwegian EPD Foundation, 2018c)
SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	m ²	65,6		(The Norwegian EPD Foundation, 2018d)
Betoon	kg	0,75	2400	(Circular Ecology, 2018)
Keraamiline seinaplaat	kg	12	2000	(Circular Ecology, 2018)

Lisa 6. Väikeelamu seina ning katuslae sisendenergiad

Tabel 8. Kivivill soojustusmaterjaliga seina sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m)

Hoone konstruktsioon	d	Välisseinte pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
Telliskivivooder	0,085	127,08	10,8	2080	22464	kg	6,9	155001,6	43056
Tuuletõkkeplaat	0,030	127,08	3,81	110	419,1	kg	16,8	7040,88	1955,8
Soojustusmaterjal kivivill	0,2	127,08	25,42	29	737,18	kg	13,8	10173,08	2825,9
	0,25	127,08	31,77	29	921,33	kg	13,8	12714,35	3531,8
	0,3	127,08	38,12	29	1105,48	kg	13,8	15255,62	4237,7
Betoonist õõnesblokk	0,140	127,08	17,79	1100	19569	kg	3,46	67708,74	18808
Krohv	0,008	98,57	0,79	800	632	kg	1,8	1137,6	316
Keraamiline seina plaat	0,008	28,51	0,23	2000	460	kg	12	5520	1533,3
Kogu sisendenergia (kivivill 0,2m)								246581,9	68495
Kogu sisendenergia (kivivill 0,25m)								249123,2	69200,9
Kogu sisendenergia (kivivill 0,3m)								251664,4	69906,8

Tabel 9. Klaasvill soojustusmaterjaliga seina sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m)

Hoone konstruktsioon	d	Välisseinte pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
Telliskivivooder	0,085	127.08	10,8	2080	22464	kg	6,9	155001,6	43056
Tuuletõkkeplaat	0,030	127.08	3,81	110	419,1	kg	16,8	7040,88	1955,8
Soojustusmaterjal klaasvill	0,2	127.08	25,41	20	508,2	kg	28	14229,6	3952,7
	0,25	127.08	31,77	20	635,4	kg	28	17791,2	4942
	0,3	127.08	38,12	20	762,4	kg	28	21347,2	5929,8
Betoonist õõnesblokk	0,140	127.08	17,79	1100	19569	kg	3,46	67708,74	18808
Krohv	0,008	98,57	0,79	800	632	kg	1,8	1137,6	316
Keraamiline seina plaat	0,008	28,51	0,23	2000	460	kg	12	5520	1533,3
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,2m)								250638,4	69621,8
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,25m)								254200	70611,1
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,3m)								257756	71598,9

Tabel 10. EPS soojustusmaterjaliga seina sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,2 m, 0,25 m, 0,3 m)

Hoone konstruktsioon	d	Välisseinte pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
Telliskivivooder	0,085	127.08	10,8	2080	22464	kg	6,9	155001,6	43056
Tuuletõkkeplaat	0,030	127.08	3.81	110	419,1	kg	16,8	7040,88	1955,8
Soojustusmaterjal EPS	0,2	127.08	25,42	24	610,1	kg	85,7	52285,57	14523,8
	0,25	127.08	31,77	24	762,48	kg	85,7	65344,54	18151,3
	0,3	127.08	38,12	24	914,88	kg	85,7	78405,22	21779,2
Betoonist õõnesblokk	0,140	127.08	17,79	1100	19569	kg	3,46	67708,74	18808
Krohv	0,008	98,57	0,79	800	632	kg	1,8	1137,6	316
Keraamiline seina plaat	0,008	28,51	0,23	2000	460	kg	12	5520	1533,3
Kogu sisendenergia (EPS 0,2m)								288694,4	80192,9
Kogu sisendenergia (EPS 0,25m)								301753,4	83820,4
Kogu sisendenergia (EPS 0,3m)								314814	87448,3

Tabel 11. Kivivill soojustusmaterjaliga katuslae sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m)

Hoone konstruktsioon	d	Katuslae pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia kokku	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
2x SBS bituumen rullkate	0,008	121	0,97			m ²	103	12463	3461,9
Katuse pealiskiv	0,03	121	3,63	144	522,72	kg	77,3	40406,3	11224
Soojustusmaterjal kivivill	0,3	121	36,3	29	1052,7	kg	13,8	14527,3	4035,4
	0,4	121	48,4	29	1403,6	kg	13,8	19369,7	5380,5
	0,5	121	60,5	29	1754,5	kg	13,8	24212,1	6725,6
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	121	0,48			m ²	103	7937,6	2204,9
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	121	19,36	2400	46464	kg	0,75	34848	9680
Krohv	0,005	121	0,61	800	488	kg	1,8	878,4	244
Kogu sisendenergia (kivivill 0,3m)								111060,6	30850,2
Kogu sisendenergia (kivivill 0,4m)								115903	32195,3
Kogu sisendenergia (kivivill 0,5m)								120745,4	33540,4

Tabel 12. Klaasvill soojustusmaterjaliga katuslae sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m)

Hoone konstruktsioon	d	Katuslae pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia kokku	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
2x SBS bituumen rullkate	0,008	121	0,97			m ²	103	12463	3461,9
Katuse pealiskate	0,03	121	3,63	144	522,72	kg	77,3	40406,3	11224
Soojustusmaterjal klaasvill	0,3	121	36,3	20	726	kg	28	20328	5646,7
	0,4	121	48,4	20	968	kg	28	27104	7528,9
	0,5	121	60,5	20	1210	kg	28	33880	9411,1
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	121	0,48			m ²	65,6	7937,6	2204,9
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	121	19,36	2400	46464	kg	0,75	34848	9680
Krohv	0,005	121	0,61	800	488	kg	1,8	878,4	244
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,3m)								116861,3	32461,5
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,4m)								123637,3	34343,7
Kogu sisendenergia (klaasvill 0,5m)								130413,3	36225,9

Tabel 13. EPS soojustusmaterjaliga katuslae sisendenergia erinevate kihipaksuste korral (0,3 m, 0,4 m, 0,5 m)

Hoone konstruktsioon	d	Katuslae pindala	Ruumala	Tihedus	Mass	Ühik	MJ ühiku kohta	Kihtide sisendenergia kokku	Kihtide sisendenergia
	m	m ²	m ³	kg/m ³	kg			MJ	kWh
2x SBS bituumen rullkate	0,008	121	0,97			m ²	103	12463	3461,9
Katuse pealiskate	0,03	121	3,63	144	522,72	kg	77,3	40406,3	11224
Soojustusmaterjal EPS	0,3	121	36,3	24	871,2	kg	85,7	74661,8	20739,4
	0,4	121	48,4	24	1161,6	kg	85,7	99549,1	27652,5
	0,5	121	60,5	24	1452	kg	85,7	124436,4	34565,7
1x SBS bituumen rullkate (õhu, aurutõke)	0,004	121	0,48			m ²	103	7937,6	2204,9
Monoliitne raudbetoonplaat	0,16	121	19,36	2400	46464	kg	0,75	34848	9680
Krohv	0,005	121	0,61	800	488	kg	1,8	878,4	244
Kogu sisendenergia (EPS 0,3m)								171195,1	47554,2
Kogu sisendenergia (EPS 0,4m)								196082,4	54467,3
Kogu sisendenergia (EPS 0,5m)								220969,7	61380,5

Lisa 7. Hoone summaarne sisendenergia ja summaarne operatiivne energia

Väikeelamu 116 m ²		Seinatarindi sisendenergia		Katuslaetarindi sisendenergia		Seinatarindi ja katuslaetarindi sisendenergia	Operatiivne energiakulu	Kogu hoone energiatarbimine
Tüüppoone (TP)	Materjal	Seinakihi soojustuse paksus	Seina sisendenergia	Katuslaekihi soojustuse paksus	Katuslae sisendenergia	Kokku	(50 aastat)	
		m	kWh	m	kWh	kWh	kWh	kWh
TP 1	kivivill	0,2	68495	0,3	30850,2	99345,2	581044	680389,2
TP 1	klaasvill	0,2	69621,8	0,3	32461,5	102083,3	586148	688231,3
TP 1	EPS	0,2	80192,9	0,3	47554,2	127747,1	568226	695973,1
TP 2	kivivill	0,25	69200,9	0,4	32195,3	101396,2	558714	660110,2
TP 2	klaasvill	0,25	70611,1	0,4	34343,7	104954,8	562542	667496,8
TP 2	EPS	0,25	83820,4	0,4	54467,3	138287,7	547636	685923,7
TP 3	kivivill	0,3	69906,8	0,5	33540,4	103447,2	544156	647603,2
TP 3	klaasvill	0,3	71598,9	0,5	36225,9	107824,8	547404	655228,8
TP 3	EPS	0,3	87448,3	0,5	61380,5	148828,8	534064	682892,8

Lisa 8. Kokkuhoitud operatiivne energia ja täiendavalt lisatud sisendenergia

Tüüppoone (TP)	Materjal	Seinakihi soojustuse paksus	Katuslaekihi soojustuse paksus	Seinatarindi ja katuslaetarindi sisendenergia kokku	Täiendav sisendenergia võrreldes TP 1	Operatiivne energiakulu (50. aastat)	Kokkuhoitud operatiivne energia võrreldes TP 1	Kogu hoone energiatarbimise kokkuhoid võrreldes TP 1
		m	m	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
TP 1	kivivill	0,2	0,3	99345,2	0	581044	0	0
TP 1	klaasvill	0,2	0,3	102083,3	0	586148	0	0
TP 1	EPS	0,2	0,3	127747,1	0	568226	0	0
TP 2	kivivill	0,25	0,4	101396,2	2051	558714	22330	20279
TP 2	klaasvill	0,25	0,4	104954,8	2871,5	562542	23606	20734,5
TP 2	EPS	0,25	0,4	138287,7	10540,6	547636	20590	10049,4
TP 3	kivivill	0,3	0,5	103447,2	4102	544156	36888	32786
TP 3	klaasvill	0,3	0,5	107824,8	5741,5	547404	38744	33002,5
TP 3	EPS	0,3	0,5	148828,8	21081,7	534064	34162	13080,3

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Martin Ott,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Hoonete energiatarbimine sõltuvalt piirdetarindite soojusisolatsiooni muutustest“, mille juhendaja on Alar Noorvee,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 31.05.2018